

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS



TESE DE DOUTORADO

**MODELAGEM BIDIMENSIONAL HIDRODINÂMICA DE ÁREAS URBANAS
PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS NO DISTRITO FEDERAL**

GABRIELA BRANQUINHO ANTONIO

BRASÍLIA, 26 ABRIL de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS



TESE DE DOUTORADO

MODELAGEM BIDIMENSIONAL HIDRODINÂMICA DE ÁREAS URBANAS PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS NO DISTRITO FEDERAL

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Ciências Humanas da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Doutor em Geografia, área de concentração de Gestão Ambiental e Territorial.

GABRIELA BRANQUINHO ANTONIO

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

BRASÍLIA, 26 ABRIL de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS



Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Ciências Humanas da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Doutor em Geografia, área de concentração de Gestão Ambiental e Territorial.

**MODELAGEM BIDIMENSIONAL HIDRODINÂMICA DE ÁREAS URBANAS
PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS NO DISTRITO FEDERAL**

GABRIELA BRANQUINHO ANTONIO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Banca de Defesa de Doutorado constituída por:

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes - Universidade de Brasília (Orientador)

Prof. Dr. Newton Moreira de Souza (Examinador Interno à UNB)

Prof. Dr. Thiago Avelar Chaves - EGL Engenharia (Examinador Externo à UNB)

Prof. Dra. Mônica dos Santos Marçal (Examinador Externo ao Programa de Pós-Graduação) -
UFRJ

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães (Suplente) - Universidade de Brasília (Examinador Interno
do Programa de Pós-Graduação)

BRASÍLIA, 26 DE ABRIL DE 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus porque até aqui me sustentou. Agradeço à minha família, que continua me amando mesmo diante da minha ausência.

Agradeço ao meu companheiro Bruno pela companhia, amizade e parceria, ficando ao meu lado todos os dias, me apoiando nas minhas empreitadas.

Gostaria de agradecer profundamente às pessoas que fizeram de Brasília um lar.

Agradeço a Yamila, uma pessoa que eu tive o prazer de conhecer e agradeço novamente por ter me apresentado e me acolhido em seu grupo de amigos tão incríveis.

Agradeço a Fabi, a brasiliense mais carioca que já vi, mais carioca do que muitos cariocas que já vi por aí.

Agradeço a Luciano, o paulista mais mineiro que já conheci, por ceder sua casa para fazermos os churrascos, momentos incríveis.

Agradeço a Aline, a primeira brasiliense a me convidar para jantar na casa dela.

Agradeço por todo o apoio, acreditando que eu iria conseguir terminar essa tese, sempre falando, “já acabou Gabi, defende isso”.

Agradeço a Ingrid, minha jovem senhora, que roubou meu coração. Agora que chegou, desejo que fique.

Aline, Fabiane, Ingrid e Yamila, vocês são incríveis e maravilhosas, lembrem-se sempre disso.

Por fim, agradeço de todo o meu coração ao meu orientador Roberto, uma pessoa que respeito e admiro muito, que me acolheu como orientanda e que me deu a oportunidade de trabalhar com algo tão incrível como a modelagem.

Agradeço aos colegas e professores do Laboratório de Sistema de Informações Espaciais - LSIE.

Agradeço à Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - ADASA pela oportunidade de aprendizado durante esse doutorado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pois sem ela seria impossível ter chegado até aqui.

Agradeço a toda a equipe do FLO-2D.

O fim é só o começo.

EPÍGRAFE

“... Existem incógnitas conhecidas, coisas que sabemos e que entendemos; existem incógnitas desconhecidas conhecidas, de coisas que sabemos que existem, mas que não entendemos; existem incógnitas desconhecidas, de coisas que não conhecemos e que não entendemos...”

(Tradução Livre de Donald Rumsfeld, *Known and Unknown*)

COMO CITAR: ANTONIO, Gabriela Branquinho. Modelagem bidimensional hidrodinâmica de áreas urbanas para mapeamento de áreas alagáveis no Distrito Federal. 2023. 243 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2023.

RESUMO

Os alagamentos são eventos que geralmente ocorrem em um curto período de tempo e de forma localizada, afetando a dinâmica das cidades e causando impactos negativos para a população e para o poder público devido à sua frequência. Existem diversas causas para os alagamentos, sendo importante conhecer os fatores naturais e antrópicos que podem contribuir para sua ocorrência, a fim de propor soluções adequadas. No Distrito Federal, ocorrem frequentemente episódios de alagamentos em todas as áreas urbanizadas, sendo relevante conhecer os locais que alagam e parâmetros relacionados ao fluxo do escoamento superficial, como a extensão da área alagada, altura da lâmina de água e a velocidade do escoamento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a modelagem hidrológica-hidrodinâmica bidimensional distribuída, acoplada a um modelo de sistema de drenagem pluvial, para simular os processos hidráulicos-hidrológicos de superfície e da hidráulica dos condutos fechados de forma integrada. Foram utilizados dados em escala de detalhe, com o objetivo de produzir produtos cartográficos também em escala de detalhe. Para superar a escassa disponibilidade de dados de precipitação horária, foi utilizado o satélite GPM (IMERG – F), que possui resolução temporal de 30 minutos.

A metodologia utilizada foi estruturada da seguinte forma: inicialmente, foi realizada a compilação e o tratamento dos dados, seguida por uma atualização até 2020 de uma compilação de dados sobre alagamentos que já existia até 2013. Em seguida, o modelo foi construído, adicionando os dados de entrada de superfície e da rede de drenagem. O modelo é bidimensional e utiliza a solução numérica de diferenças finitas, utilizando a equação de águas rasas na sua forma completa.

A atualização dos dados de alagamento, utilizando um Sistema de Informação Geográfica, permitiu conhecer espacialmente os locais no DF que são mais acometidos por alagamentos, bem como os impactos e danos mais frequentes, levantando questionamentos sobre a maior ou menor notificação de algumas áreas. Quanto ao uso do GPM, de maneira geral, verificou-se que a qualidade de sua estimativa é dependente das características ambientais locais e que a escala horária apresenta um bom desempenho na representação da forma dos histogramas.

Por fim, a modelagem permitiu conhecer a forma da área alagada e suas características, produzindo resultados dentro do que era esperado. Por ser um produto em escala de detalhe, pode ser utilizado em estudos de risco e perigo.

Palavras-chaves: Modelagem hidrológica-hidrodinâmica, Dados de precipitação, Alagamentos.

ABSTRACT

Floods are events that usually occur over a short period of time and in a localized manner, affecting the dynamics of cities and causing negative impacts on the population and the government due to their frequency. There are various causes for floods, and it is important to understand the natural and anthropogenic factors that can contribute to their occurrence in order to propose appropriate solutions. In the Federal District, episodes of flooding frequently occur in all urban areas, making it relevant to identify flood-prone areas and parameters related to surface runoff, such as the extent of the flooded area, water depth, and flow velocity.

In this context, the objective of this study is to apply two-dimensional distributed hydrological-hydraulic modeling, coupled with a stormwater drainage system model, to simulate surface hydrological-hydraulic processes and closed conduit hydraulics in an integrated manner. Detailed scale data were used to produce detailed cartographic products. To overcome the limited availability of hourly precipitation data, the GPM (IMERG – F) satellite data with a temporal resolution of 30 minutes was utilized.

The methodology was structured as follows: initially, data compilation and processing were performed, followed by an update until 2020 of a compilation of flood data that existed until 2013. Then, the model was built, incorporating surface input data and the drainage network. The model is two-dimensional and uses the finite difference numerical solution, employing the complete shallow water equation.

The update of flood data using a Geographic Information System allowed for spatial identification of the most affected areas by floods in the Federal District, as well as the most frequent impacts and damages, raising questions about the higher or lower reporting of certain areas. Regarding the use of GPM, it was generally found that the quality of its estimation depends on local environmental characteristics, and the hourly scale performs well in representing the shape of the histograms.

Finally, the modeling enabled the identification of the shape and characteristics of the flooded area, yielding results in line with expectations. Due to its detailed scale, it can be used in risk and hazard studies.

Keywords: Hydrological-hydraulic modeling, Precipitation data, Floods.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema de representação do impacto da urbanização e da impermeabilização do solo no ciclo hidrológico. | 9 |
| Figura 2 – Resumo dos processos hidrológicos e hidráulicos. | 11 |
| Figura 3 - Esquema exemplificando a diferença entre enchente e inundação. | 11 |
| Figura 4 - a) exemplo de enxurrada; e, b) exemplo de alagamento. | 12 |
| Figura 5 – Exemplos de alagamentos no Brasil. Figura a1 e a2: Jardim Petrópolis, Cuiabá – MT; Figura b1: Rua Jardim Botânico (Zona Sul), Figura b2: Esquina das ruas do Catete com Silveira Martins (Zona Sul) e Figura b3: Rua Paulo Mazzucchelli (Zona Oeste), Rio de Janeiro; Figura c1 e c2, Jatiucá, Maceió – AL; Figura d1: Vicente Pires, Figura d2: Pôr do Sol, Figura d3: Ceilândia, Figura d4: Universidade de Brasília (Asa Norte, Plano Piloto), Figura d5: Via W3 norte, na quadra 511 da Asa Norte, Plano Piloto, Figura d6: Tesourinha da quadra 209 norte da Asa Norte, Plano Piloto, Distrito Federal. | 13 |
| Figura 6 – Números de artigos publicados no Período de 1999 - 2019/Base de Pesquisa: Base <i>Science Direct</i> / Termo Pesquisado: <i>Modelagem de Alagamento Urbanos</i> | 15 |
| Figura 7 – Quantidade de artigos publicados no período de 1999 - 2019/ Laranja, são os modelos gratuitos/Azul, são os modelos pagos / Cinza, são os modelos com versão de estudante ou versão gratuita/ Base de Pesquisa: <i>Science Direct</i> / Foi pesquisado o nome de cada modelo. | 20 |
| Figura 8 – Quantidade de artigos publicados no período de 1999 – 2019 sobre modelagem de alagamentos urbanos (<i>urban flood modeling</i>) /Base de Pesquisa: Base <i>Science Direct</i> / Termo utilizado na busca: <i>Urban Flood Modeling</i> | 23 |
| Figura 9 – Quantidade de trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, por Região Administrativa, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos. | 28 |
| Figura 10 - Métodos mais utilizados nos trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos. | 28 |
| Figura 11 - Mapa de localização das áreas de estudo, dos trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos. | 29 |
| Figura 12 - Cálculo de velocidade nas oito direções, em uma malha numérica. | 35 |
| Figura 13 – Esquema Conceitual do Modelo FLO-2D integrado do modelo SWMM. | 36 |
| Figura 14 – Representação das áreas de contribuição/sub-bacias no modelo SWMM e no modelo FLO-2D. | 37 |
| Figura 15 - Mapa de localização das áreas de estudo utilizadas em relação ao território do Distrito Federal. | 44 |
| Figura 16 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação as áreas de Estratégias de Regularização Fundiária do PDOT no Distrito Federal. | 46 |
| Figura 17 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação ao mapeamento de situação de implantação da rede de drenagem de águas pluviais no Distrito Federal. | 48 |
| Figura 18 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação ao uso e cobertura do solo do Distrito Federal. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação à declividade do Distrito Federal. | 50 |
| Figura 20 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires, Distrito Federal. | 51 |
| Figura 21 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires, Distrito Federal. | 52 |
| Figura 22 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação aos solos pedológicos do Distrito Federal. | 53 |
| Figura 23 Mapa de localização das áreas de estudo à compartimentação geomorfológica do Distrito Federal. | 54 |
| Figura 24 – Frequência dos meses com maior acumulado mensal por mês considerando uma série de 5 anos (2014 a 2019). Estação Pluviométrica de Referência A001 INMET localizada no Sudoeste – DF..... | 55 |
| Figura 25 - Fluxograma da compilação dos dados cidadãos. | 58 |
| Figura 26 – A figura (A) apresenta um esquema das inconsistências e a figura (B) apresenta exemplos com a rede utilizada | 69 |
| Figura 27 - A figura (A) apresenta um esquema com a forma correta de como devem estar os segmentos de condutos e a forma incorreta de alguns trechos da rede de drenagem de águas pluviais que foram encontrados; e a figura (B) apresenta um exemplo real da rede de drenagem de águas pluviais antes e depois da correção..... | 70 |
| Figura 28 – Esquema ideal resumido da rede de drenagem pluvial..... | 71 |
| Figura 29 – Representação da boca de lobo adotada. | 71 |
| Figura 30 - Interface gráfica do modelo FLO-2D através do SIG Quantum GIS. Em vermelho são as aplicações do <i>plugin</i> | 72 |
| Figura 31 – Conjunto de camadas editáveis e das camadas esquemáticas, do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica..... | 73 |
| Figura 32 – Caixa de ferramentas do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica. | 73 |
| Figura 33 – Ferramentas de transformação, <i>user layer – schematic layers</i> do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica..... | 74 |
| Figura 34 - Representação com aproximação da malha numérica e dos elementos, utilizando a interface gráfica do modelo FLO-2D através do <i>plugin</i> no SIG Quantum GIS. | 75 |
| Figura 35 - Esquema de representação da malha numérica para uma bacia hidrográfica no modelo FLO-2D..... | 75 |
| Figura 36 - Representação da Áreas Bloqueadas através do Fator de Redução de Área - ARF no modelo FLO-2D. | 76 |
| Figura 37 – Exemplo de malha regular quadrada com Fator de Redução de Área - (ARF) aplicado para uma edificação..... | 77 |
| Figura 38 – Representação e um exemplo esquemático de uma estrutura hidráulica no modelo FLO-2D..... | 79 |
| Figura 39 – Janela onde são inseridas as variáveis de controle, as quais são armazenadas no arquivo CONT.DAT, do modelo FLO-2D. | 79 |
| Figura 40 - Janela onde são inseridas as variáveis de tolerância, as quais são armazenadas no arquivo TOLER.DAT, do modelo FLO-2D..... | 80 |
| Figura 41 – Etapas gerais do processo de modelagem Fonte: Adaptado de FLO-2D (2021)..... | 81 |
| Figura 42 – Fluxograma resumindo as etapas de calibração | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figura 43 - Exemplo de hietograma utilizado na pesquisa 720 minutos | 85 |
| Figura 44 – Média móvel de cinco anos das notificações de alagamento ao longo dos anos no Distrito Federal. Descrição: Linha vermelha representa a média móvel de 5 anos; linha preta representa a linha de tendência (linear); e, Barras azuis, quantidade de alagamentos ao longo dos anos..... | 87 |
| Figura 45 – Distribuição Espacial dos Pontos de Notificações de Alagamento. Figura A: Mapa geral do Distrito Federal; Figura B: Mapa da Região Administrativa do Plano Piloto; Figura C: Mapa da Região Administrativa de Vicente Pires; e, na Figura D: Mapa da Região Administrativa de Ceilândia..... | 88 |
| Figura 46 - Distribuição das ocorrências de alagamento por região administrativa..... | 88 |
| Figura 47 – Mapa de Densidade de pontos de alagamento por Região Administrativa | 90 |
| Figura 48 - Mapa de Calor dos pontos de notificações de alagamento do Distrito Federal..... | 91 |
| Figura 49 - Mapa das notificações de alagamento em relação à compartimentação geomorfológica do Distrito Federal..... | 92 |
| Figura 50 – Mapa de uso e cobertura do solo e as notificações de alagamento; planta chave A, apresentando um trecho da Região Administrativa de Vicente Pires; e, a planta chave B, apresentando um trecho da Região Administrativa do Plano Piloto na Asa Norte..... | 93 |
| Figura 51 – Mapa com a distância euclidiana (m) a partir dos pontos de alagamento, para o Distrito Federal. | 94 |
| Figura 52 – Exemplos de Pontos de Notificações de Alagamentos próximo a hospitais e centros de saúde. Ponto 1 – Tesourinha da 209, Asa Norte – Plano Piloto; Ponto 2 – Pôr do Sol/Sol Nascente; Ponto 3 – Vicente Pires; Ponto 4 – Taguatinga; Ponto 5 - Avenida Alagados (Santa Maria); Ponto 6 - Hospital Regional de Ceilândia..... | 95 |
| Figura 53 – Gráfico de dos alagamentos pela distância euclidiana das bocas de lobo do DF. | 96 |
| Figura 54 - Relação entre a precipitação média anual acumulada da estação pluviométrica A001 e as notificações de alagamento. Linha azul da média, é a precipitação média anual que ocorre no Distrito Federal (1477mm). | 97 |
| Figura 55 - Gráfico de BloxPot dos alagamentos ao longo dos meses do cadastro de notificações de alagamento para o Distrito Federal e precipitação média acumulada mensal. Período de 2000 a 2020. Estação pluviométrica considerada: A001 do INMET, período de 2000 a 2020..... | 98 |
| Figura 56 – Esquerda: relação dos locais mais afetados do Distrito Federal, com base no cadastro de alagamento; Direita: relação dos danos mais notificados no Distrito Federal, com base no cadastro de alagamento..... | 99 |
| Figura 57 – Prejuízos materiais causados pela precipitação que ocorreu no dia 22/04/2019 no Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília, Campos Darcy Ribeiro, localizado na Asa Norte – Plano Piloto. | 100 |
| Figura 58 - Hietogramas de precipitação para o período de 2014 a 2019: a) mensal; e b) diário. | 105 |
| Figura 59 – Gráficos de dispersão entre a estação pluviométrica A001 e o Grid (pixel) correspondente do GPM: Figura a) escala anual; Figura b) escala trimestral; Figura c) escala mensal; e Figura d) escala diária. | 106 |
| Figura 60 - Mapa das Estações Pluviométricas e do GRID/GPM em relação a Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 61 - Relação entre os hietogramas da Estação Pluviométrica e do GPM para a faixa de 25 a 50 mm/24 horas / para a faixa de 50 a 100 mm/24 horas, entre a A046 e o GRID do GPM 76..... | 112 |
| Figura 62 – Histograma de frequência das precipitações medidas pela estação pluviométrica A001 do INMET e pelo GPM. | 115 |
| Figura 63 – Hietograma de precipitação diária do GPM e da estação pluviométrica do INMET A001, ao longo de 15 anos..... | 116 |
| Figura 64 – Extensão da mancha de alagamento para diferentes valor de coeficiente de manning | 122 |
| Figura 65 – Velocidade Máxima do Alagamento (m/s) para diferentes valor de coeficiente de manning | 122 |
| Figura 66 – Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade mínima, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 123 |
| Figura 67 - Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade média, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 123 |
| Figura 68 - Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade máxima, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 124 |
| Figura 69 - Gráfico de dispersão das áreas alagadas máximas, com lâmina de água maior que 1 cm (0,01 m). Área de cada bacia urbanas simulada: Asa Norte, Plano Piloto – 24,00 km ² /Santa Maria: 18,19 km ² / Núcleo Bandeirante: 12,04 km ² / Vicente Pires: 12,27 km ² / Mestre D' Armas: 7,32 km ² / Sol Nascente: 14,24 km ² | 130 |
| Figura 70 – Localização das áreas de estudo em relação ao uso e cobertura do solo, escala 1:20.000. ... | 131 |
| Figura 71 – Diferença entre a Mancha Alagada Máxima e a Mancha Alagada Final | 133 |
| Figura 72 – Alagamentos em vias de alta circulação de veículos de transporte coletivo (Distrito Federal). | 134 |
| Figura 73 – Impactos dos alagamentos no sistema viário (Distrito Federal). | 134 |
| Figura 74 – Exemplo de uma área na Região Administrativa do Pôr do Sol/Sol Nascente. Comparação entre a extensão e a lâmina de água máxima e ao final da simulação, para os tempos de retorno de 2 e 50 anos. | 135 |
| Figura 75 – Lâmina de água máxima e ao final da simulação, para a região das “tesourinhas”, na Asa Norte – Plano Piloto, DF. | 136 |
| Figura 76 - Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s), na sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 137 |
| Figura 77 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante, DF..... | 138 |
| Figura 78 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Ribeirão, Santa Maria, DF..... | 139 |
| Figura 79 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Nova Gênese, Pôr do Sol/Sol Nascente, DF. | 140 |
| Figura 80 - Mapa de altura de lâmina de água máxima (m), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante. | 141 |
| Figura 81 - Mapa de velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante. | 142 |
| Figura 82 – Mapa de altura de lâmina de água máxima (m), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Sol Nascente e Pôr do Sol SHSN, chácara 74. | 143 |

| | |
|--|-----|
| Figura 83 - Mapa de velocidade máxima do escoamento superficial (m/s), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Sol Nascente e Pôr do Sol SHSN, chácara 74. | 143 |
| Figura 84 - Histograma de Frequência dos diâmetros da rede coletora da bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 145 |
| Figura 85 – Relação da quantidade de nós sobrecarregados e inundados com a extensão da mancha alagada. | 147 |
| Figura 86 – Localização dos nós que ficaram sobrecarregados no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 148 |
| Figura 87 – Localização dos nós que ficaram inundados no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 149 |
| Figura 88 – Perfil 1 transversal e longitudinal da rede - localizado na frente do ICC Norte (SWMM/FLO2D), no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 150 |
| Figura 89 - Perfil transversal e longitudinal da rede 2 / SWMM/FLO2D - via lateral do ICC Norte, no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. | 151 |
| Figura 90 - Exemplo de áreas alagadas ICC no campus da Universidade de Brasília – UNB na Asa Norte/Plano Piloto. | 152 |
| Figura 91 – Localização das Bocas de Lobo no ICC Norte, no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. Em vermelho, são as bocas de lobo, as setas azuis indicando a direção do fluxo superficial e a superfície em verde é a área livre que alaga. | 153 |
| Figura 92 – Situação da rede de drenagem de águas pluviais sobrecarregada nas quadras 112/212 e no SEPN 511, na Asa Norte, Região Administrativa do Plano Piloto. | 154 |
| Figura 93 – Situação da rede de drenagem de águas pluviais inundada nas quadras 112/212 e no SEPN 511, na Asa Norte, Região Administrativa do Plano Piloto. | 155 |
| Figura 94 – Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 2 anos. | 156 |
| Figura 95 - Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 10 anos. | 157 |
| Figura 96 - Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 50 anos. | 158 |
| Figura 97 - Resultado da simulação realizado por Demasceno (2021) para o ICC no campus da Universidade de Brasília – UNB na Asa Norte/Plano Piloto e os resultados obtidos na presente pesquisa. | 160 |
| Figura 98 – Exemplo de da influência do modelo digital de terreno no resultado da simulação. | 161 |
| Figura 99 – Duração das simulações em horas. | 162 |
| Figura 100 - Frequência das ocorrências de alagamento por tempos de retorno | 164 |
| Figura 101 – Mapa com os tempos de retorno espacializados dos eventos que deflagraram as ocorrências de alagamento na Bacia Hidrográfica da Asa Norte | 164 |
| Figura 102 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-..... | 165 |
| Figura 103 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF. | 166 |

| | |
|--|------|
| Figura 104 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF..... | 166 |
| Figura 105 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF..... | 167 |
| Figura 106 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF..... | 167 |
| Figura 107 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Santa Maria - DF..... | i |
| Figura 108 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Mestre D’Armas - DF..... | ii |
| Figura 109 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires - DF..... | iii |
| Figura 110 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica da Vila Cauhy - DF..... | iv |
| Figura 111 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Pôr do Sol/Sol Nascente-Ceilândia – DF..... | v |
| Figura 112 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Asa Norte, Plano Piloto – DF..... | vi |
| Figura 113 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | vii |
| Figura 114 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | viii |
| Figura 115 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | ix |
| Figura 116 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | x |
| Figura 117 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | xi |
| Figura 118 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF..... | xii |
| Figura 119 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xiii |
| Figura 120 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xiv |
| Figura 121 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xv |
| Figura 122 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF..... | xvi |
| Figura 123 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF. | xvii |

| | |
|---|--------|
| Figura 124 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF. | xviii |
| Figura 125 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF. | xix |
| Figura 126 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF. | xx |
| Figura 127 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF. | xxi |
| Figura 128 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | xxii |
| Figura 129 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | xxiii |
| Figura 130 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | xxiv |
| Figura 131 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | xxv |
| Figura 132 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | xxvi |
| Figura 133 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | xxvii |
| Figura 134 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | xxviii |
| Figura 135 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | xxix |
| Figura 136 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | xxx |
| Figura 137 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | xxxi |
| Figura 138 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | xxxii |
| Figura 139 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | xxxiii |
| Figura 140 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | xxxiv |
| Figura 141 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | xxxv |
| Figura 142 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | xxxvi |
| Figura 143 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF. | xxxvii |

| | |
|--|---------|
| Figura 144 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF..... | xxxviii |
| Figura 145 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF..... | xxxix |
| Figura 146 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF..... | xl |
| Figura 147 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xli |
| Figura 148 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xlii |
| Figura 149 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF..... | xliii |
| Figura 150 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF. | xliv |
| Figura 151 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.. | xlv |
| Figura 152 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF..... | xlvi |
| Figura 153 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF..... | xlvii |
| Figura 154 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF..... | xlviii |
| Figura 155 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF..... | xlix |
| Figura 156 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D’Armas – DF..... | l |
| Figura 157 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | li |
| Figura 158 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | lii |
| Figura 159 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | liii |
| Figura 160 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | liv |
| Figura 161 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF..... | lv |

| | |
|---|--------|
| Figura 162 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | lvi |
| Figura 163 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | lvii |
| Figura 164 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | lviii |
| Figura 165 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | lix |
| Figura 166 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF..... | lx |
| Figura 167 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | lxi |
| Figura 168 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | lxii |
| Figura 169 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | lxiii |
| Figura 170 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF..... | lxiv |
| Figura 171 – Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Mestre D’ Armas, Planaltina, Distrito Federal..... | lxv |
| Figura 172 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Santa Maria, Distrito Federal..... | lxvi |
| Figura 173 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Sol Nascente/Pôr do Sol, Distrito Federal..... | lxvii |
| Figura 174 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Núcleo Bandeirantes, Distrito Federal..... | lxviii |
| Figura 175 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica da Asa Norte – Plano Piloto, Distrito Federal..... | lxix |
| Figura 176 – Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Mestre D’ Armas, Planaltina, Distrito Federal..... | lxx |
| Figura 177 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Santa Maria, Distrito Federal..... | lxxi |
| Figura 178 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Sol Nascente/Pôr do Sol, Distrito Federal..... | lxxii |
| Figura 179 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Núcleo Bandeirantes, Distrito Federal..... | lxxiii |
| Figura 180 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica da Asa Norte – Plano Piloto, Distrito Federal..... | lxxiv |

ÍNDICE DE QUADRO

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Resumo do grau de simplificação dos modelos hidrodinâmicos em função das simplificação dos termos da Equação de Águas Rasas. | 14 |
| Quadro 2 - Resumo dos modelos matemáticos usualmente aplicados para modelagem e simulação de eventos alagamento e inundação. | 17 |
| Quadro 3 – Principais características das estratégias de discretização numérica utilizados para a resolução das equações de Saint-Venant. | 22 |
| Quadro 5 – Breve compilação de trabalhos e o fenômeno estudado, utilizando o modelo FLO2D. | 33 |
| Quadro 5 – Resumo de alguns trabalhos com os produtos, períodos, escala temporal, quantidade de postos e região de estudo. | 44 |
| Quadro 6 – Relação da estação pluviométrica e o Grid de referência, para o período disponível. | 63 |
| Quadro 7 - Compilação dos dados de entrada do modelo | 80 |

ÍNDICE DE TABELA

- Tabela 1 - Parâmetros morfométricos 51
- Tabela 2 – Resumo dos Parâmetros morfométricos das sub-bacias hidrográficas estudadas. 56
- Tabela 3 - Parâmetro morfométrico, Coeficiente de Compacidade 56
- Tabela 4 - Parâmetro morfométrico, Fator Forma 57
- Tabela 5 – Parâmetro Morfométrico, densidade de drenagem 57
- Tabela 6 - Parâmetro Morfométrico, Índice de Circularidade 58
- Tabela 7 – Descrição dos parâmetros morfométricos 61
- Tabela 8 - Valores de Curva Número (CN) para cada tipo de solo e classe de uso e cobertura. 78
- Tabela 9 - Precipitação total do evento simulado e a duração do hietograma de chuva 82
- Tabela 10 - Porcentagem de equipamento público por faixa de distância euclidiana, utilizando os pontos de alagamento como ponto de partida. 94
- Tabela 11 - Quantidade de registros em relação a escala temporal de medição das estações pluviométricas e do GPM 101
- Tabela 12 – Relação de falhas nas séries hidrológicas de precipitação 101
- Tabela 13 - Correlação entre os valores de precipitação medidos pelas estações pluviométricas e o GRID do GPM. 102
- Tabela 14 – Tabela com a média dos valores dos cenários. 104
- Tabela 15 - Correção de Pearson por unidade geomorfológica (plano intermediário e rebordo) para o período chuvoso e o não chuvoso. 108
- Tabela 16 - Correção de Pearson por unidade geomorfológica (plano intermediário e rebordo) para o período chuvoso. 108
- Tabela 17 - Resultados das Correlações de Pearson e Coeficiente de Determinação Ajustado para as faixas de precipitações acumuladas 24 horas. 110
- Tabela 18 – Resumo da quantidade de dias com falha, dias sem falha e a porcentagem de falha por ano. 113
- Tabela 19 – Resumo da porcentagem de falha por mês 114
- Tabela 20 - Resumo métricas estatísticas de performance: Correlações de Pearson (CP), Diferenças das Média (MD) e Raiz quadrada do erro-médio (RMSE). 117
- Tabela 21 - Resumo Métricas Estatísticas de Contingência: Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR) e Índice de Sucesso Crítico (CSI). 117
- Tabela 22 – Relação de eventos estimados pelo GPM com tempos de retorno maiores que 50 anos. 118
- Tabela 23 - Estatística de Performance dos Eventos Extremos (>50 mm) 120
- Tabela 24 – Métricas do ajuste do coeficiente de manning por classe de uso e cobertura do solo. 125
- Tabela 25 – Resumo das extensões das manchas de alagamento 128
- Tabela 26 - Relação de área ocupada e não ocupada por bacia urbana simulada. 130
- Tabela 27 - Resumo das extensões da mancha de alagamento das áreas de regularização ARIS da Vila Cauhy (Núcleo Bandeirante), ARIS Ribeirão (Santa Maria) e ARIS Nova Gênese (Pôr do Sol/Sol Nascente). 140

Tabela 28 – Resumo da extensão da rede coletora de águas pluviais, da quantidade de *junctions* e de *Outlet*.
144

Tabela 29 – Resumo da quantidade de nós sobrecarregados e inundados nas bacias hidrográficas simuladas
146

Tabela 30 – Relação da área e da quantidade de elementos por área de estudo. 162

Tabela 31 - Quantidade totais de notificações de alagamento por intervalo de tempo de retorno em relação a quantidade de notificações de alagamento que intersectam a mancha alagada. 164

Tabela 32 – Relação das notificações de alagamento que relataram altura da lâmina de água 168

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS | 1 |
| ÍNDICE DE QUADRO | 10 |
| ÍNDICE DE TABELA..... | 11 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA | 1 |
| 1.2. HIPÓTESES..... | 5 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 6 |
| 1.3.1. OBJETIVO GERAL..... | 6 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 6 |
| 2. PROBLEMATIZAÇÃO DE PESQUISA..... | 7 |
| 2.1. BACIA HIDROGRÁFICA E OS ALAGAMENTOS..... | 8 |
| 2.2. VISÃO GERAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS | 14 |
| 2.2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS NO PROCESSO DE MODELAGEM..... | 22 |
| 2.2.2. DESAFIOS DA MODELAGEM DE ALAGAMENTOS..... | 23 |
| 2.2.3. TRABALHOS DE MODELAGEM DE ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO NO DF..... | 25 |
| 2.3. MAPEAMENTO COLABORATIVO E DADOS CIDADÃOS..... | 28 |
| 2.3.1. <i>CROWDSOURCING</i> | 28 |
| 2.3.2. EXPERIÊNCIAS COM <i>DADOS CIDADÃOS</i> COM INUNDAÇÕES FLUVIAIS E ALAGAMENTOS | 30 |
| 2.3.3. DADOS CIDADÃOS COMO UMA ALTERNATIVA PARA A COMPILAÇÃO DE DADOS DE ALAGAMENTOS | 31 |
| 2.4. MODELO FLO-2D..... | 33 |
| 2.4.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES | 33 |
| 2.4.2. INTEGRAÇÃO FLO2D E SWMM | 35 |
| 2.4.3. SOLUÇÃO NUMÉRICA | 38 |
| 2.5. <i>GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT</i> (GPM) | 40 |
| 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 44 |
| 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 44 |
| 3.2. COMPILAÇÃO DAS NOTIFICAÇÕES DE ALAGAMENTO | 58 |
| 3.2.1. COMPILAÇÃO DOS DADOS CIDADÃOS | 58 |
| 3.2.2. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS CIDADÃOS | 59 |
| 3.2.3. ANÁLISES ESPACIAIS DOS DADOS CIDADÃOS..... | 59 |
| 3.3. ANÁLISE MORFOMÉTRICA DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS | 61 |
| 3.4. DADOS DE PRECIPITAÇÃO..... | 63 |
| 3.2.1. Estações pluviométricas..... | 63 |
| 3.2.2. <i>Global Precipitation Measurement</i> – GPM | 64 |
| 3.2.3. Métricas estatísticas..... | 64 |
| 3.3. COMPILAÇÃO E TRATAMENTOS DOS DADOS | 68 |
| 3.3.1. Uso e Cobertura da terra | 68 |
| 3.3.2. Sistema de Drenagem de Águas Pluviais..... | 68 |
| 3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTERFACE GRÁFICA DO MODELO FLO-2D NO QGIS... 72 | |
| 3.4.1. Considerações sobre a construção do modelo | 74 |

| | | |
|--------|---|-------|
| 3.5. | MODELAGEM HIDROLOFICA-HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL | 80 |
| 3.5.1. | CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO..... | 81 |
| 3.5.2. | PRECIPITAÇÃO DE TEMPO DE RETORNO..... | 85 |
| 3.5.3. | VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES | 85 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 87 |
| 4.1. | ALAGAMENTOS NO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DADOS CIDADÃOS..... | 87 |
| 4.1.1. | NOTIFICAÇÕES DE ALAGAMENTO E A PRECIPITAÇÃO..... | 96 |
| 4.1.2. | DADOS CIDADÃOS COMO UMA FONTE DE DADOS PARA CONHECER OS IMPACTOS DOS ALAGAMENTOS..... | 99 |
| 4.2. | ANÁLISE DOS DADOS DO GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT - GPM..... | 101 |
| 4.2.1. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A QUALIDADE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DE MEDIÇÃO EM SOLO E DO GPM..... | 101 |
| 4.2.2. | ANÁLISE DO GRID GPM X ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM SOLO..... | 102 |
| 4.2.3. | CORRELAÇÃO POR UNIDADE GEOMORFOLÓGICA..... | 107 |
| 4.2.4. | CORRELAÇÃO POR FAIXA DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM 24 HORAS | 109 |
| 4.2.5. | DETALHAMENTO DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA A001 DO INMET..... | 113 |
| 4.3. | MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE ALAGAMENTOS | 121 |
| 4.3.1. | CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A SENSIBILIDADE DO MODELO A VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING | 121 |
| 4.3.2. | CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CALIBRAÇÃO..... | 124 |
| 4.3.3. | SIMULAÇÃO DE TEMPO DE RETORNO E ANÁLISE DE PONTOS CRÍTICOS.. | 127 |
| 4.3.4. | CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA | 158 |
| 4.3.5. | VALIDAÇÃO DO MODELO COM BASE NOS DADOS CIDADÃOS | 163 |
| 4.4. | DIRETRIZES PARA MITIGAÇÃO DOS ALAGAMENTOS | 169 |
| 5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 171 |
| 5.2. | ALAGAMENTOS NO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DADOS CIDADÃOS..... | 171 |
| 5.3. | GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT - GPM..... | 171 |
| 5.4. | MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE ALAGAMENTOS | 173 |
| 5.5. | MODELO HIDRODINÂMICO FLO-2D | 173 |
| 6. | TRABALHOS FUTUROS | 175 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA | 176 |
| | APÊNDICE A: Extensão da mancha alagada para diferente tempo de retorno..... | i |
| | APÊNDICE B: Altura da lâmina de água máxima (m) – ASA NORTE / PLANO PILOTO - DF..... | vii |
| | APÊNDICE C: Santa Maria no entorno da Via Alagados – Lâmina de Água MÁXIMA (m)..... | xii |
| | APÊNDICE D: Planaltina, ARIS Mestre D’Armas I – Lâmina de Água Máxima (m)..... | xvii |
| | APÊNDICE E: Vicente Pires, ARINE Vicente Pires – Lâmina de Água MÁXIMA (m)..... | xxii |
| | APÊNDICE F: Núcleo Bandeirante, ARIS Vila Cauhy – Lâmina de Água LIMA (m)..... | xxvii |
| | APÊNDICE G: Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – Lâmina de Água Máxima (m)..... | xxxii |
| | APÊNDICE H: ASA NORTE, PLANO PILOTO, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) | xxxvi |
| | | xxxvi |
| | APÊNDICE I: SANTA MARIA, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s)..... | xli |
| | APÊNDICE J: PLANALTINA, ARIS MESRE D’ ARMAS I, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) | xlvi |

| | |
|--|-----|
| APÊNDICE L: VICENTE PIRES, ARINE VICENTE PIRES, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) | li |
| APÊNDICE M: NÚCLEO BANDEIRANTES, ARIS VILA CAUHY, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)..... | lvi |
| APÊNDICE N: PÔR DO SOL/SOL NASCENTE, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s)lxi | |
| APÊNDICE O: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS SOBRECARRREGADOS | lxv |
| APÊNDICE P: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS INUNDADOS | lxx |

1. INTRODUÇÃO

1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, é observado um aumento na ocorrência de desastres no Brasil (CEPED/UFSC, 2013). Os alagamentos estão incluídos nesse grupo, embora apareçam de forma discreta, tanto em relação à ocorrência quanto à porcentagem de pessoas afetadas. Atualmente, eles se constituem como um dos grandes problemas das cidades.

Embora os alagamentos sejam citados no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o Glossário da Defesa Civil e das Defesas Cíveis Estaduais (CNM, 2015) os define como acúmulos de água que ocorrem nos leitos das ruas e no perímetro urbano, deflagrados por fortes precipitações em cidades com sistemas de drenagem deficientes. Alguns autores, como Marco e Cayuela (1994), Sene (2013), Tesema et al. (2020) e Moy de Vitry e Leitão (2020), corroboram com a definição supracitada. Os alagamentos são entendidos como incremento do escoamento superficial que excedeu a capacidade de transporte da rede de drenagem pluvial, usualmente deflagrado por um evento de precipitação.

Contudo, o que é preocupante e comumente observado é a deflagração de alagamentos mesmo mediante uma precipitação de baixa intensidade, o que justifica o que é exposto por Yang et al. (2020) sobre a alta frequência com que os alagamentos vêm ocorrendo e como isso pode se constituir em um risco substancial em relação à capacidade de suporte das cidades em se recuperarem. Dessa forma, podem desencadear diversos prejuízos econômicos para a população e para o poder público (TESEMA et al., 2020).

De acordo com Yang et al. (2020), a grande maioria das cidades possui sistemas de rede de drenagem de águas pluviais subdimensionados em relação às atuais demandas, sendo esse um problema comum nas cidades.

De acordo com Fernandes (2010), o sistema de drenagem de Maceió – AL não considerou adequadamente o crescimento da cidade, fazendo com que toda a orla de Maceió alague. Em outras cidades, como o Rio de Janeiro, além das questões estruturais relativas à infraestrutura básica, a morfologia da cidade, com encostas íngremes, favorece a ocorrência de alagamentos ainda mais intensos, devido à ocupação e impermeabilização das encostas, aumentando a quantidade e a velocidade do escoamento superficial e reduzindo o tempo de contração dessas áreas (COSTA et al., 2018).

A ocorrência de alagamentos e seus impactos podem ser observados também em outros países, como é o caso da área metropolitana de San Luis Potosí no México, onde

a agência de proteção civil zoneou diversas áreas que alagam e inundam na cidade (PALACIO-APONTE et al., 2022).

T.A.T. do et al. (2022) estudaram a cidade de Lao Cai na China, que atualmente apresenta uma forte taxa de urbanização, que poderá vir a crescer mediante o programa de desenvolvimento urbano da cidade. A cidade já sofre com as chuvas extremas, considerando seu atual contexto de ocupação. Os autores acreditam que é fundamental que o crescimento da cidade seja orientado sob uma ótica de desenvolvimento sustentável, visando reduzir os riscos existentes.

Apesar das definições essencialmente indicarem problemas da rede de drenagem de águas pluviais como agente que propicia a ocorrência dos alagamentos, outros fatores antrópicos, como a impermeabilização do solo, padrão das edificações e do sistema viário, também podem contribuir para sua deflagração.

Além disso, outros fatores naturais inerentes às características das bacias hidrográficas, como os parâmetros morfométricos, também apresentam potencial de contribuir e explicar a deflagração dos alagamentos.

O Distrito Federal (DF) é acometido todos os anos por alagamentos, causando danos materiais, ambientais e perdas de vidas. Embora os alagamentos no Distrito Federal sejam amplamente conhecidos, atualmente as informações públicas sobre essa temática podem ser encontradas em Batista (2014), o qual realizou uma compilação de informações sobre alagamentos, inundações e erosões a partir de notícias de jornais da imprensa formal.

As informações compiladas originalmente por Batista (2014) foram utilizadas no Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal (PDSB-DF, 2017) e no Portal do Território Resiliente, que é a primeira iniciativa de mapeamento colaborativo no DF. Essa iniciativa foi proposta na revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, sob o comando da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e de Habitação (BRASIL, 2012). Entretanto, não há uniformidade sobre a oficialidade e confiabilidade dessas informações.

Há também o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (PDDU-2008), que identificou, a partir de simulações unidimensionais da rede de drenagem de águas pluviais, diversos pontos de sobrecarga. Atualmente, esse estudo está desatualizado, considerando as novas ocupações que se consolidaram e a própria rede de drenagem.

Nos últimos 10 anos, desenvolveram-se trabalhos que buscam identificar e entender os problemas da rede de drenagem de águas pluviais no DF (COSTA, 2013; SOUZA, 2014; ARAUJO, 2018; ROCHA, 2019). A abordagem relativa à modelagem matemática hidrológica-hidráulica unidimensional (1D) é a mais utilizada até o presente momento, por ser relativamente simples de construir e de operar, demandando um custo computacional baixo, se comparado a formulações de modelos matemáticos.

Embora a modelagem unidimensional seja amplamente utilizada e difundida para representar a dinâmica da rede de drenagem de águas pluviais (TENG et al., 2017), há simplificações inerentes ao modelo, como a generalização dos parâmetros de entrada e a forma de representação da topografia, o que impacta a representação da dinâmica dos processos hidrológicos que ocorrem na superfície e a complexidade do ambiente urbano que se encontra sob essa superfície topográfica (RASHID et al., 2016; HOCH et al., 2019).

De acordo com Liu et al. (2019), em estudos de modelagem que buscam simular a hidrodinâmica hidrológica-hidráulica que contribui para a deflagração dos alagamentos, é importante que os dados de entrada e, principalmente, a topografia sejam representados de forma mais detalhada possível.

Nesse sentido, as formulações de modelos bidimensionais (2D) distribuídos conseguem suprir as limitações referentes aos modelos unidimensionais, principalmente no que tange à representação da topografia que, em modelos distribuídos, é representada de forma contínua. Embora as abordagens bidimensionais apresentem maior complexidade, são ainda formulações mais simples do que os modelos tridimensionais (SCHUBERT et al., 2008).

Sendo assim, os modelos bidimensionais hidrodinâmicos distribuídos possibilitam analisar de forma conjunta a maioria dos processos que ocorrem em superfície, tais como a transformação da chuva em vazão (ou escoamento superficial), a propagação desse escoamento em uma superfície, as perdas iniciais inerentes ao método de infiltração e a infiltração.

No caso do modelo que será utilizado nesta pesquisa, em virtude da sua integração com outros modelos, é possível ainda incluir na análise a dinâmica hidrológica de subsuperfície relativa às águas subterrâneas e a propagação do fluxo em condutos fechados (rede de drenagem de águas pluviais).

Contudo, a disponibilidade de dados de precipitação em escalas horárias ainda é muito incipiente no Brasil, principalmente devido ao custo do equipamento. De modo que

as estações pluviométricas convencionais (que registram o acumulado de 24 horas) não possibilitam identificar os eventos de precipitação extrema, principalmente em termos de volume, duração e forma do hietograma, principalmente em cidades que apresentam heterogeneidade na forma que a precipitação ocorre ao longo do território.

Nesse contexto, outros métodos de monitoramento e/ou estimativas de precipitação vêm ganhando destaque, como os produtos de precipitação por satélite (SPPs), os quais vêm apresentando resultados promissores e, por vezes, são gratuitos, com resolução espacial e temporal que possibilitam realizar estudos em escala detalhe e semi-detalhe, possibilitando o monitoramento quase em tempo real (JIANG e BAUER-GOTTWEIN, 2019).

Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa é utilizar uma abordagem matemática hidrológica-hidrodinâmica bidimensional distribuída, acoplada a um modelo que possibilita incluir o sistema de drenagem de águas pluviais na análise para identificar a mancha de alagamento em diferentes sub-bacias hidrográficas urbanas do Distrito Federal.

Além disso, para viabilizar o objetivo geral da pesquisa, serão realizados estudos complementares, como uma análise simplificada utilizando precipitação por satélite, para verificar a possibilidade de utilização e confiabilidade dessa precipitação estimada como dado de entrada de precipitação.

Ao mesmo tempo, também será realizada uma compilação de notificações de alagamento, buscando atualizar o cadastro de notificações já elaborado por Batista (2014), de modo que esses dados também serão utilizados em outras etapas do processo de simulação.

1.2.HIPÓTESES

A partir dos produtos que serão obtidos nessa pesquisa, algumas hipóteses foram levantadas:

- a) O cadastro histórico de notificações de alagamento possibilita conhecer o território e definir locais de maior ocorrência a alagamentos;
- b) A utilização de dados de Precipitação de satélite GPM (IMERG – Final Run) pode subsidiar estudos no âmbito da modelagem;
- c) A identificação da mancha de alagamento para diferentes precipitações de tempo de retorno, utilizando uma modelagem hidráulica em escala de detalhe, possibilitará planejar estratégias de intervenção em drenagem urbana; e,
- d) As manchas de alagamento para diferentes tempos de retorno têm detalhamento para realizar um zoneamento de perigo.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia para simular eventos de alagamentos aplicando um modelo bidimensional acoplado a um modelo de sistema de drenagem pluvial para a análise e compreensão dos processos dos alagamentos nas áreas urbanas do Distrito Federal.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Atualizar uma base de dados espacial de ocorrências de alagamentos para o período de 2013 a 2020;
- Analisar o desempenho entre os dados de precipitação do satélite GPM (IMERG – F) e os dados das estações pluviométricas em solo, visando avaliar a potencialidade dos dados de precipitação do GPM como um dado de entrada de precipitação na modelagem dos processos de alagamentos;
- Desenvolver simulações e análises para todas as unidades hidrográficas urbanas, definidas a priori, com diferentes tempos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 anos); e,
- Desenvolver análise dos pontos críticos da rede de drenagem pluvial para diferentes tempos de retorno (2, 5, 10, 25 e 50 anos).

2. PROBLEMATIZAÇÃO DE PESQUISA

A temática relacionada aos alagamentos vem atraindo uma crescente preocupação do poder público e de estudos acadêmicos devido à percepção dos impactos negativos, podendo constituir-se como uma grande ameaça para muitas cidades (YANG et al., 2020). É importante destacar que os alagamentos não devem ser considerados somente como um problema de ordem natural, mas também em virtude da falta de planejamento urbano sustentável, que propicia disfunções no ambiente hidrológico urbano.

Em resposta a essa problemática, a modelagem de alagamentos vem se mostrando como uma ferramenta que permite obter informações diversas sobre a dinâmica hidrológica e hidráulica do escoamento superficial durante e após o alagamento (TESEMA et al., 2020).

De acordo com Nkwunonwo et al. (2020), a disponibilidade de dados é atualmente um dos maiores desafios para a utilização e escolha de modelos, podendo inviabilizar abordagens mais complexas. Os autores afirmam que, em países emergentes, isso fica mais evidente devido à falta de investimento para a obtenção de dados primários precisos e detalhados (espacial e temporalmente).

Dessa forma, esta revisão bibliográfica busca trazer um resumo do conceito de alagamento a ser utilizado nesta tese, a utilização de dados de precipitação para esse tipo de modelagem, uma revisão sobre modelagem e quais as principais abordagens que estão sendo utilizadas para tratar dos alagamentos urbanos e da drenagem urbana no Distrito Federal, bem como a utilização de dados de validação na modelagem.

2.1.BACIA HIDROGRÁFICA E OS ALAGAMENTOS

A bacia hidrográfica pode ser entendida como uma área de captação natural da água precipitada, sendo delimitada por divisores de água (OLIVEIRA DIAS et al., 2019), os quais contribuem para que o escoamento superficial venha a convergir para um único ponto de saída.

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema, no qual ocorrem balanços de entrada proveniente da chuva e saída de água através do exutório (TUCCI, 2007 *apud* PORTO e PORTO, 2008).

As características físicas, e dessa forma a paisagem, de uma bacia hidrográfica sofrem alterações no decorrer do tempo, tendo como origem características naturais e antrópicas, tais como intemperismo, erosão, movimentos de massa, inundações e transformação da paisagem em virtude da urbanização, falta de planejamento urbano e de intervenções associadas a grandes empreendimentos que alteram fortemente a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas.

As características naturais da bacia hidrográfica incluem a morfologia das vertentes, o padrão de drenagem, a forma da bacia, a declividade, a tipologia dos canais fluviais, os tipos de solo e a vegetação.

Enquanto a origem antrópica está associada essencialmente à transformação da paisagem em virtude da urbanização, falta de planejamento urbano e de intervenções associadas a grandes empreendimentos que alteram fortemente a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas.

As características naturais e antrópicas impactam diretamente a quantidade de água produzida, a infiltração, o escoamento superficial e subsuperficial e a evapotranspiração. Dessa forma, o tempo de concentração das bacias hidrográficas é reduzido, produzindo intervenções antrópicas inerentes ao processo de urbanização, tais como a impermeabilização do solo, canalizações e retificações dos rios, que contribuem para que a água precipitada que vira escoamento superficial seja transportada de forma mais rápida ao exutório da bacia hidrográfica.

O processo de urbanização de uma bacia hidrográfica, mesmo quando planejado, deflagra impactos significativos no ciclo hidrológico em escala local e no balanço hídrico (GODYN et al., 2022). Salvadore et al. (2015) sugerem que a severidade dos impactos é diretamente proporcional ao nível e ao tipo de urbanização que é praticado na bacia

hidrográfica. Na Figura 1, temos um exemplo dos impactos da urbanização e da impermeabilização do solo no ciclo hidrológico.

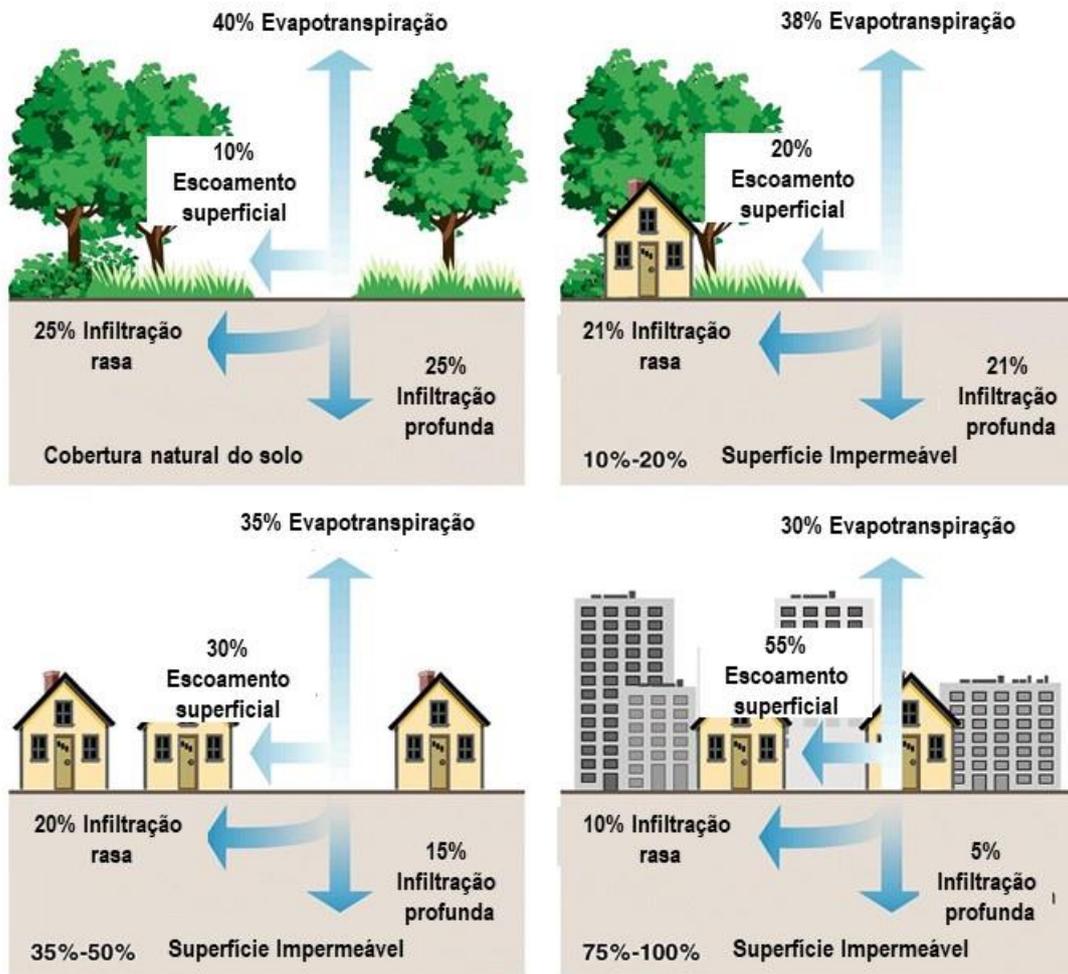


Figura 1 – Esquema de representação do impacto da urbanização e da impermeabilização do solo no ciclo hidrológico.

Fonte: Adaptado de Prince George’s County (1999).

Em um sistema natural, parte da água precipitada é transformada em escoamento superficial e as demais parcelas estão sujeitas às perdas iniciais e contínuas (TESEMA et al., 2020). As perdas iniciais representam a parcela de precipitação que é interceptada pela vegetação e edifícios, incluindo também água que fica represada em valas, pequenas depressões e em superfícies pavimentadas ou não. As perdas contínuas estão relacionadas ao processo de infiltração e evapotranspiração, sendo mais intensas no início da precipitação, apresentando uma tendência a diminuir exponencialmente, uma vez que o ponto de saturação do solo se aproxima de ser atingido (PRINCE GEORGE’S COUNTY, 1999).

Quando em um ambiente com baixa taxa de impermeabilização e o volume de precipitação excede a capacidade de retenção e infiltração relacionadas às perdas iniciais e contínuas, o volume excedente começa a escoar através da superfície, devendo ser captado pela rede de drenagem de águas pluviais. Em contrapartida, em um ambiente impermeabilizado, a etapa de perdas contínuas é impactada negativamente, de modo que ocorre uma redução significativa da infiltração. Dessa forma, ocorre um incremento substancial no escoamento superficial, além da redução da taxa de infiltração (TESEMA et al., 2020).

De acordo com Sjoman e Gill (2014), paisagens urbanas com uma cobertura impermeável do solo variando entre 50% e 90% podem gerar um incremento de 40% a 83% no escoamento superficial. Ren et al. (2020) estudaram uma bacia hidrográfica experimental na Faixa de Gaza e concluíram que o aumento de 1% na área construída resultaria em uma redução de 41% na infiltração e um incremento de 100% no escoamento superficial.

Semelhante foi observado por Oliveira e DeFee (2007) na bacia hidrográfica de White Osk Bayou, onde o incremento de 10% da área impermeável contribuiu para um aumento de 146% do escoamento superficial anual da bacia, dos quais a taxa de contribuição da urbanização foi de 77%.

Devido ao incremento do escoamento superficial, a capacidade da rede de drenagem de águas pluviais pode ser excedida, comprometendo a capacidade de absorção e transporte do volume excedente, podendo ainda fazer com que o volume drenado retorne à superfície (FLO-2D, 2021) (Figura 2).

Além disso, a superfície impermeável tem uma rugosidade menor que a natural, fazendo com que a resistência do fluxo seja reduzida, aumentando a velocidade do escoamento e reduzindo o tempo de contração da bacia hidrográfica. Os fatores supracitados contribuem para que a água precipitada permaneça por mais tempo na superfície, escoando em direções preferenciais e, dependendo da topografia do terreno, acumulando nas porções com forma plana e côncava (FLO-2D, 2021).



Figura 2 – Resumo dos processos hidrológicos e hidráulicos.

Fonte: Adaptado de FLO-2D *Storm Drain Manual* (2021).

As características da bacia hidrográfica (naturais e antrópicas) podem deflagrar eventos hidrológicos, tais como alagamentos, enxurradas e inundações. Embora esses eventos tenham a precipitação como entrada, que tem potencial para contribuir com sua ocorrência, eles diferenciam-se em decorrência do local e dos processos físicos associados.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (2007), as inundações ocorrem em virtude do extravasamento da vazão natural de um córrego para a planície de inundação (várzea ou leito maior). A enchente, por sua vez, é uma situação de cheia do córrego, sem que haja extravasamento (Figura 3).



Figura 3 - Esquema exemplificando a diferença entre enchente e inundação.

Fonte: Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT (2007)

A inundação ocorre por uma série de fatores, tais como as contribuições laterais do escoamento superficial para o córrego, que são incrementadas quando há ocupações na planície de inundação. Além disso, a redução do tempo de contração pode ocorrer por intervenções no córrego e/ou impermeabilização do solo.

Embora muitas vezes utilizados como sinônimos, os alagamentos e as enxurradas diferenciam-se. Os alagamentos são essencialmente caracterizados por um acúmulo de água, enquanto as enxurradas são entendidas como um escoamento com alta energia (Figura 4).



Figura 4 - a) exemplo de enxurrada; e, b) exemplo de alagamento.

Fonte: Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT (2007)

Dessa forma, a enxurrada é definida como um escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte, podendo ou não ter associação com processos fluviais (IPT, 2007). Já os alagamentos são definidos como um acúmulo momentâneo de água devido a problemas no sistema de drenagem de águas pluviais (IPT, 2007).

De acordo com o Glossário da Defesa Civil e das Defesas Cíveis Estaduais (CNM, 2015), os alagamentos ocorrem nos leitos das ruas e no perímetro urbano, podendo ou não ter relação com processos de natureza fluvial.

Alguns autores como, Marco e Cayuela, (1994), Sene (2013), Leit Moy e Vitry, (2020), Tesema et al. (2020), entende que os alagamentos são caracterizados como um incremento do escoamento superficial que excede a capacidade de transporte da rede de drenagem de águas pluviais, usualmente deflagrado por um evento de precipitação.

Embora haja alguma variação acerca do conceito de alagamento, essencialmente, todas as definições apresentadas aqui, entendem que os alagamentos estão associados a ambientes urbanos e a deficiência do sistema de drenagem de águas pluviais.

Yang et al. (2020) apontam que na maioria das cidades, os sistemas de rede de drenagem de águas pluviais existentes estão desatualizados ou subdimensionados, com

número insuficiente de entradas, as quais podem ainda estar danificadas ou entupidas, tornando o ambiente urbano ainda mais sensível à deflagração de alagamentos. Além disso, normalmente, o processo de urbanização supera rapidamente o processo de expansão ou atualização dos sistemas de infraestrutura de drenagem urbana (FERNANDES, 2010). A Figura 5, são apresentados alguns exemplos de cidades no Brasil, com problemas de alagamento.



Figura 5 – Exemplos de alagamentos no Brasil. Figura a1 e a2: Jardim Petrópolis, Cuiabá – MT; Figura b1: Rua Jardim Botânico (Zona Sul), Figura b2: Esquina das ruas do Catete com Silveira Martins (Zona Sul) e Figura b3: Rua Paulo Mazzucchelli (Zona Oeste), Rio de Janeiro; Figura c1 e c2, Jatiucá, Maceió – AL; Figura d1: Vicente Pires, Figura d2: Pôr do Sol, Figura d3: Ceilândia, Figura d4: Universidade de Brasília (Asa Norte, Plano Piloto), Figura d5: Via W3 norte, na quadra 511 da Asa Norte, Plano Piloto, Figura d6: Tesourinha da quadra 209 norte da Asa Norte, Plano Piloto, Distrito Federal.

Fonte: Figuras a1 e a2, acervo próprio; Figuras b1, b2, b3, c1, c2, d1, d2, d3, d4, d5 e d6, Portal de Notícias G1.

Dependendo dos condicionantes apresentados e da intensidade das precipitações, os alagamentos podem gerar impactos também com intensidades variadas, embora sejam caracterizados por serem rápidos e pontuais (MARCO e CAYUELA, 1994).

Quando ocorrem de forma mais severa, com altas velocidades e lâminas de água de moderada a alta, podem oferecer risco potencial à vida. No entanto, na sua forma menos intensa, afetam significativamente o cotidiano da população, trazendo problemas na mobilidade urbana e podendo deflagrar prejuízos econômicos para o poder público e privado. Deste modo, as simulações a partir da modelagem matemática podem auxiliar em muito o planejamento das cidades (TESEMA et al., 2020).

2.2. VISÃO GERAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Um modelo matemático é a representação de um sistema real através de equações matemáticas teóricas ou empíricas, cujo objetivo é de buscar respostas para diferentes entradas e dessa forma realizar diagnóstico e prognóstico (HAGGETT e CHORLEY, 1967).

Apesar do modelo matemático ser uma representação de um sistema, é importante ressaltar que qualquer modelo por mais completo que seja, sempre será apenas uma simplificação do fenômeno físico e do sistema que se deseja representar (TUCCI, 2005).

Por se tratar de um conjunto de equações matemáticas, a escolha do modelo depende fundamentalmente do fenômeno físico que será estudado, dos processos que deseja representar (HARVEY, 1969). De modo que, o melhor modelo é aquele que consegue se adequar as necessidades do projeto e do técnico que vai executar a modelagem (TUCCI, 2005).

Na modelagem de alagamentos, normalmente utilizam-se dois tipos de modelos: o hidrológico que modela a transformação da precipitação em vazão; e, o hidrodinâmico, que representa a dinâmica do escoamento da água sobre as superfícies que compõem a bacia hidrográfica. Em alguns casos, utilizam-se modelos hidrodinâmico acoplados a componentes que simulam também (em conjunto) a hidrologia e hidráulica de superfície e a hidráulica, dos condutos fechados da rede de drenagem de águas pluviais.

Os modelos hidrodinâmicos baseiam-se essencialmente no conjunto de equações de Saint-Venant também conhecidas como as *Shallow Water Equations* (SWE) ou Equações de Águas Rasas (TENG et al., 2017). Possuem o objetivo de representar os escoamentos em rios naturais ou canalizados, condutos, reservatórios, entre outros. A classificação dos modelos hidrodinâmicos é realizada conforme o grau de simplificação introduzido na equação (Quadro 1).

Quadro 1 – Resumo do grau de simplificação dos modelos hidrodinâmicos em função das simplificação dos termos da Equação de Águas Rasas.

| Tipo de Modelos Hidrodinâmico | Nome | Termos da equação dinâmica |
|-------------------------------|-----------------|---|
| Simplificado | Onda Cinemática | Termos referentes a Gravidade e ao Atrito |
| Simplificado | Onda de Difusão | Pressão, Gravidade e Atrito |
| Completo | Dinâmico | Inércia, Pressão, Gravidade e Atrito |

A depender da representação do fluxo, da forma como o modelo resolve as equações diferenciais, os modelos hidrodinâmicos podem ser classificados em: unidimensionais (1D), bidimensionais (2D), e tridimensionais (3D) (TSAKIRIS e BELLOS, 2014).

A Figura 6, apresenta a evolução no número de publicações, que estão disponíveis, entre os anos de 1999 e de 2019, na base de dados da Science Direct do portal Periódicos Capes, de modelos 1D, 2D e 3D nos últimos 20 anos. O gráfico deixa claro, uma tendência de maior utilização de modelos 2D e 3D em relação aos modelos 1D, podendo ser explicado devido a evolução tecnológica, disponibilidades de dados adequados e até mesmo pela difusão do conhecimento.

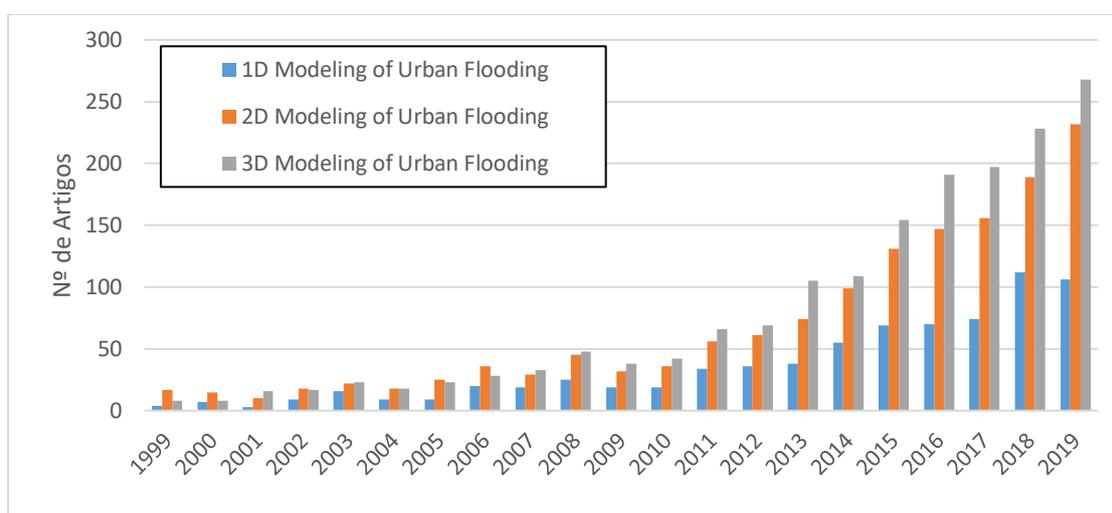


Figura 6 – Números de artigos publicados no Período de 1999 - 2019/Base de Pesquisa: Base Science Direct / Termo Pesquisado: Modelagem de Alagamento Urbanos.

O modelo unidimensional é a formulação matemática mais simplificada para a representação do fluxo no canal. A depender do fenômeno a ser estudado e do objetivo a ser alcançado, a modelagem unidimensional pode ser utilizada sem que ocorra qualquer perda na qualidade dos resultados e na representação dos processos (TENG et al., 2017).

Modelos unidimensionais assumem uma série de simplificações, tornando-os relativamente simples de construir e fáceis de operar, demandando um custo computacional menor que os modelos bidimensionais e tridimensionais. Dessa forma, são ainda amplamente utilizados para estudos de inundação e alagamentos, como por exemplo o HECRAS na sua versão 1D e o SWMM (RASHID et al., 2016; HOCH et al., 2019).

Por assumirem muitas simplificações, a depender do objetivo do estudo, podem não ser apropriados para hidrodinâmica das inundações em planícies, pois apresentam limitações para simular a difusão lateral da onda de inundação e apresentam uma

discretização topográfica a partir de seções transversais em vez de superfícies contínuas (SCHUBERT et al., 2008; RASHID et al., 2016; TENG et al., 2017).

Apesar dos esforços para melhorar as simulações de alagamentos e inundações, a forma de representação da topografia e dos elementos urbanos, como ruas e prédios, ainda é um fator limitante para modelos 1D (TENG et al., 2017). Em resposta as limitações dos modelos unidimensionais, foram desenvolvidos os modelos bidimensionais. Estes modelos são capazes de simular o tempo e a duração do evento com alta precisão e detalhe nos processos (como infiltração, evapotranspiração, a influência de estruturas hidráulicas no escoamento). São capazes ainda de simular adequadamente a velocidade do escoamento e o nível de água atingidos ao longo do evento simulado (TENG et al., 2017).

Uma das grandes vantagens da utilização de modelos bidimensionais para simulação em ambientes urbanos é a representação abrangente da hidrodinâmica do fluxo, e a possibilidade de representar superfícies topográficas contínuas (TENG et al., 2017). Além disso, permitem inserir uma grande variedade de elementos urbanos como ruas, meio-fio e edificações, além da representação espacialmente distribuída de todos os parâmetros. Desta forma, os resultados também são espacialmente distribuídos e em duas dimensões (x,y) (TENG et al., 2017).

Os modelos tridimensionais apresentam um nível de complexidade maior que os modelos unidimensionais e bidimensionais. Utilizam a equação de Navier-Stoke completa, consideram o fluxo da água inteiramente tridimensional, sendo possível representar dinamicamente a física do fluxo de água, especialmente nas áreas urbanas (NKWUNONWO et al., 2020). Entretanto, modelos tridimensionais apresentam alguns fatores limitantes, que incluem a viabilidade computacional, obtenção de dados na qualidade e formato necessário. Além disso, podem apresentar problemas de precisão na representação da superfície livre de água e a turbulência de alta ordem. A depender do objetivo, as abordagens tridimensionais podem ser demasiadamente complexas e desnecessárias, em muitos casos uma aproximação bidimensional de águas rasas pode ser mais adequada (SCHUBERT et al., 2008).

Com a evolução dos modelos, a representação adequada da área a ser simulada se torna imprescindível para a modelagem hidrodinâmica (PINÓS e TIMBE, 2019). A topografia deixa de ser representada por seções transversais e passa a ser representada através de uma superfície contínua, sendo discretizada na forma de malhas numéricas (KIM et al., 2015).

As malhas podem ser estruturadas, as quais se adaptam melhor a topografias de áreas urbanas; não-estruturadas, que se adaptam melhor para topografias naturais; e mistas, sendo possível definir zonas onde a malha será estruturada e não estruturada (AZAD et al., 2017).

As malhas podem ainda ser uniformes e não uniformes ao longo do domínio computacional. Alguns modelos, como o IBER (2014), possibilitam definir zonas as quais serão representadas por malhas uniformes e por malhas não uniformes. A utilização de malhas não-uniformes, permite aplicar um determinado nível de refinamento em áreas complexas e utilizar malhas mais espaçadas em áreas com pouca necessidade de detalhamento, obtendo uma celeridade na simulação (HU et al., 2018; COSTABILE et al., 2019).

Além disso, vem sendo desenvolvido modelos que permitem a utilização de malhas adaptativas, que se baseiam na otimização do processo de simulação, sendo possível modificar e adaptar dinamicamente a malha, espaçando ou refinando ao longo da simulação, favorecendo a redução do custo computacional (HU et al., 2018; SAVANT et al., 2019).

O Quadro 2, lista alguns modelos mais citados em trabalhos de alagamentos e inundações urbanas em periódicos científicos cadastrados na base de dados Science Direct do portal Periódicos da Capes.

Quadro 2 - Resumo dos modelos matemáticos usualmente aplicados para modelagem e simulação de eventos alagamento e inundação.

| Modelo | Dimensão | Discretização numérica | Tipo de malha | Discretização temporal | Gratuito |
|------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| BASEMENT | 1D, 2D e 3D | Volumes Finitos | Malha não estruturada | Explícito | Gratuito |
| Delft3D | 2D e 3D | Volumes Finitos | Malha flexível | - | Gratuito |
| Delft-FEWS | 2D/3D | - | - | - | Pago/licença uso não comercial |
| DIVAST- TVD 2-D | 2D | Diferenças Finitas | - | Explícito | Pago |
| DIVAST | 2D | Diferenças Finitas | - | Implícito | Pago |
| FESWMS-2DH | 2D | Elementos Finitos | - | - | Gratuito |
| FLDWAV | 1D | Diferenças Finitas | - | Implícito | Pago/ Versão gratuita com limitação |

| Modelo | Dimensão | Discretização numérica | Tipo de malha | Discretização temporal | Gratuito |
|------------------------|-----------------|--|-----------------------|-------------------------------|--|
| FLO2D | 2D | Diferenças Finitas | Malha estruturada | Explícito | Pago/ Versão gratuita com limitação /Licença estudante |
| Flood Modeller | 1D/2D | - | Malha estruturada | Implícito | Pago/ Versão gratuita com limitação |
| GLOFRIM | 1D/2D | - | - | Explícito | Gratuito |
| HEC - HAS | 1D/2D | Diferenças Finitas (1D)/Volumes Finitos (2D) | - | Implícito | Gratuito |
| HiPIMS | 2D | Volumes Finitos | - | Implícito | Gratuito |
| IBER | 2D | Volumes Finitos | Malha não estruturada | Explícito | Gratuito |
| ISIS - FREE | 1D/2D | - | - | - | Pago |
| ISIS 1D | 1D | - | - | - | Pago |
| ISIS 2D | 2D | - | - | - | Pago |
| ISIS-FAST | 1D/2D | - | - | - | Pago |
| JFLOW | 2D | Diferenças Finitas | - | Explícito | Pago |
| LISFLOOD | 1D | GIS-based distributed hydrologic model | - | - | Gratuito |
| LISFLOOD-FP | 2D | Diferenças Finitas | - | Explícito | Gratuito |
| MIKE 21 | - | Diferenças Finitas | Malha não estruturada | Implícito | Pago |
| MIKE 11 | 1D | - | - | - | Pago |
| MIKE URBAN 2010 | 1D/2D | Diferenças Finitas | - | Implícito | Pago |
| MIKE-FLOOD | 1D/2D | - | - | - | Pago |
| PCSWMM | 2D | Diferenças Finitas | - | - | Pago |
| RiverFlow2D | 1D/2D | Volumes Finitos | Malha não estruturada | Explícito | Pago |

| Modelo | Dimensão | Discretização numérica | Tipo de malha | Discretização temporal | Gratuito |
|------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| SisBaHia | 3D/2D | Elementos Finitos | - | - | Gratuito |
| SOBEK 1D | 1D | Diferenças Finitas | - | - | Pago |
| SOBEK 2D | 2D | Diferenças Finitas | Malha estruturada | - | Pago |
| SWMM | 1D | Diferenças Finitas | - | Implícito | Gratuito |
| TELEMAC | 2D | Elementos Finitos ou Volumes Finitos | Malha estruturada (triangular) | - | Pago |
| TELEMAC | 3D | Elementos Finitos ou Volumes Finitos | Malha estruturada (triangular) | - | Gratuito |
| TELEMAC - MASCARET (TOMAWA) | 2D/3D | Elementos Finitos ou Volumes Finitos | Malha não estruturada | Implícito | Gratuito |
| TRENT | Full 2D | Diferenças Finitas | - | Explícito | Pago |
| TUFLOW 1D | 1D | - | - | - | Pago |
| TUFLOW 2D | 2D | Diferenças Finitas | - | - | Pago |

Dos 36 modelos apresentados no Quadro 2, 18 são pagos e não possuem menção a licença para estudantes e/ou universidade e, 4 são pagos e possuem alguma modalidade. Na Figura 7, é apresentado um gráfico indicando a quantidade de artigos publicados por modelo listado no Quadro 2, indicando quais são somente pagos, gratuitos e que possuem uma versão gratuita ou com licença de estudante.

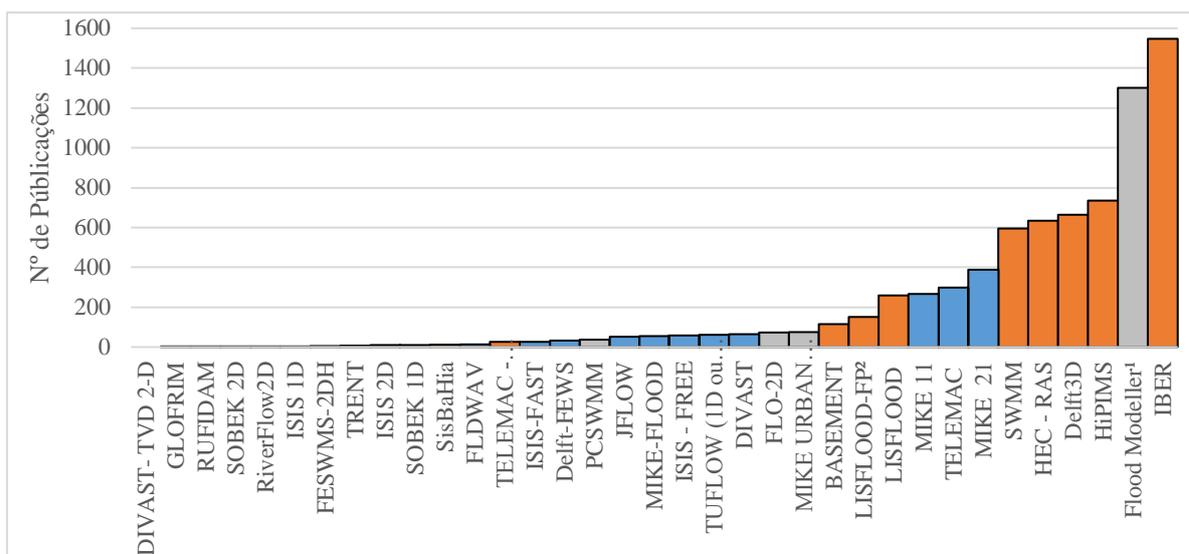


Figura 7 – Quantidade de artigos publicados no período de 1999 - 2019/ **Laranja**, são os modelos gratuitos/**Azul**, são os modelos pagos / **Cinza**, são os modelos com versão de estudante ou versão gratuita/ Base de Pesquisa: *Science Direct* / Foi pesquisado o nome de cada modelo.

Dentre os modelos gratuitos apresentados na figura 4, o modelo IBER (2014) é o que vem sendo mais citado nas publicações. Isto ocorre, devido a abrangência de processos que este modelo pode simular. Dentre as opções, podemos destacar: inundações fluviais urbanas e costeiras, transporte de sedimento, qualidade da água e, mais recentemente, foi adicionado um módulo de habitat que estuda questões relacionadas a eco hidráulica.

Cabe ressaltar que o modelo IBER, não possui integração com modelos de simulação hidráulica de rede de drenagem de águas pluviais, como o SWMM. E a curva de aprendizado e a dinâmica de inserção dos dados de entrada, demandando um esforço maior em relação a outros modelos que possuem integração com algum SIG.

Assim como o FLO2D, o *Flood Modeller* trabalha com áreas urbanas, sendo possível simular diversos elementos urbanos, como o sistema de drenagem pluvial, possibilitando a simulação simultaneamente dos processos hidráulicos e hidrológicos em superfície, a propagação do fluxo dentro da rede de drenagem e a troca de fluxo de superfície e rede.

O modelo *Flood Modeller* nas versões pagas e gratuitas, apresenta limitação de nós e elementos de grade, para estudos urbanos. Além de ser bem completo, é acoplado a um modelo de sistema de drenagem pluvial (SWMM), permitindo uma simulação integrada.

Apesar de não ser um dos mais citados, o FLO2D não apresenta nenhuma limitação quanto ao número de elementos de grade e nós em sua versão paga e na licença de

estudante, dependendo somente da capacidade computacional para realizar o processamento. É capaz de simular diversos processos (hidrológicos de superfície, de subsuperfície e hidráulicos) e possui integração com o modelo SWMM.

Além das questões supracitadas, outro fator importante na escolha de um modelo é a curva de aprendizado e conseqüentemente a disponibilidade de material como manuais e treinamentos. Modelos comerciais, em geral tendem a apresentar interface gráfica mais amigáveis e intuitivas do que modelos gratuitos. Um exemplo disso é o modelo PCSWMM (comercial) se comparado ao SWMM (gratuito).

De maneira geral, o que podemos observar é uma tendência na utilização de modelos 2D e 3D. Apesar do nível de complexidade destes modelos e da necessidade de demanda de dados de entrada, tendem a representar melhor a superfície e os processos físicos. Cabe ressaltar que, podem se mostrar onerosos computacionalmente, principalmente quando aplicado a grandes áreas e em escala de detalhe (TENG et al., 2017). A qualidade, quantidade e disponibilidade dos dados de entrada, principalmente em áreas com escassez de dados, pode se revelar um grande desafio para a adoção de modelos 2D e 3D (ZHAO et al., 2019).

Os modelos podem ainda trabalhar com dois esquemas de discretização do tempo (TUCCI, 2005). A forma implícita, indicado para simulações estáticas e, a explícita, para simulações dinâmicas. A principal diferença entre eles está na forma de como são calculados os deslocamentos de cada nó da malha.

Em um esquema explícito os modelos utilizados são totalmente lineares e estáveis, sendo possível adotar grandes passos de tempo sem que o modelo perca a estabilidade numérica. Entretanto, quando ocorre a necessidade de o tempo ser reduzido, o modelo pode vir a apresentar problemas de convergência e estabilidade.

Os métodos implícitos por sua vez, apresentam a capacidade de trabalhar com pequenos passos de tempo e, são geralmente utilizados em problemas não-lineares. Quando utilizado em passos de tempo longos, pode haver perda na acurácia dos resultados (CHAPRA et al., 2011).

Os modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, utilizam estratégias de discretização numérica para a sua resolução (TSAKIRIS e BELLOS, 2014), sendo a diferença entre as estratégias o nível de complexidade dos algoritmos necessários para resolver as equações resultantes e na estabilidade do modelo numérico. O Quadro 3 apresenta as principais características de cada método numérico.

Quadro 3 – Principais características das estratégias de discretização numérica utilizados para a resolução das equações de Saint-Venant.

| Elementos Finitos | Diferenças Finitas | Volumes Finitos |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - As equações são multiplicadas por uma função de peso antes de serem integradas em todo o domínio; e - O domínio é dividido em elementos discretos que podem ser quadriláteros ou triângulos. | <p>Mais fácil para ser utilizado em geometrias simples; e</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aproximações das derivadas são obtidas pela expansão da série de Taylor ou aproximação polinomial. | <ul style="list-style-type: none"> - Utiliza a forma integral das equações; - O domínio é dividido em volumes de controle contíguos e as equações de conservação são aplicadas a cada um deles; - As integrais de superfície e de volume são aproximadas por fórmulas de quadratura; e - Pode acomodar qualquer tipo de malha, é conservativo e fácil de programar. |

2.2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE INCERTEZAS NO PROCESSO DE MODELAGEM

Como todo modelo, por mais completo que seja, é apenas uma simplificação do fenômeno físico e do sistema que se deseja representar (CHRISTOFOLETI, 1999). Todos os modelos possuem diversas fontes de incertezas, que de acordo com Lima et al. (2007) e Melsen et al. (2019), podem ser segmentadas em duas categorias:

- a) Incerteza aleatória: associadas aos processos naturais, que não podemos controlar ou reduzir, as quais resultam da variabilidade aleatória dos fenômenos hidrológicos;
- b) Incerteza epistêmica: associada a representação insuficiente ou inadequada dos processos envolvidos, por meio das hipóteses assumidas para representar os fenômenos físicos e dos parâmetros utilizados.

De acordo com Liu e Merwade (2018), as incertezas epistêmica podem ser agrupadas da seguinte forma: (1) entrada dos dados; (2) estrutura do modelo; (3) as simplificações que serão assumidas; e (4) o método e a disponibilidade de dados para a calibração e validação. Na modelagem de alagamento, a entrada dos dados e a disponibilidade de dados para a calibração e validação são os maiores fatores de incertezas (MOY DE VITRY e LEITÃO, 2020).

Os níveis de complexidades, simplificações e hipóteses adotadas nas equações utilizadas pelos modelos, também agregam níveis de incerteza ao modelo. De acordo com Moy de Vitry e Leitão (2020), as etapas de calibração e validação raramente são de fato realizadas de forma adequada, devido a carência de dados de monitoramento acerca do fenômeno estudado.

No caso dos alagamentos, a carência de dados de monitoramento se torna ainda mais problemática. Isto ocorre, por estes fenômenos ocorrerem em escala local e o tempo de permanência da água em superfície é variável, sendo usualmente pequeno. Desse modo, se torna uma tarefa difícil realizar medições diretas em campo ou utilizar produtos de sensoriamento remoto gratuitos que consigam captar o evento.

2.2.2. DESAFIOS DA MODELAGEM DE ALAGAMENTOS

A quantidade de estudos de alagamentos vem crescendo todos os anos em virtude do incremento da frequência e da intensidade com que vêm ocorrendo. Além disso, os avanços tecnológicos vêm possibilitando trabalhar com modelos mais complexos permitindo simular e representar processos que antes não eram possíveis.

Podemos observar na Figura 8, o crescimento no número de publicações na temática de modelagem de alagamentos urbanos.

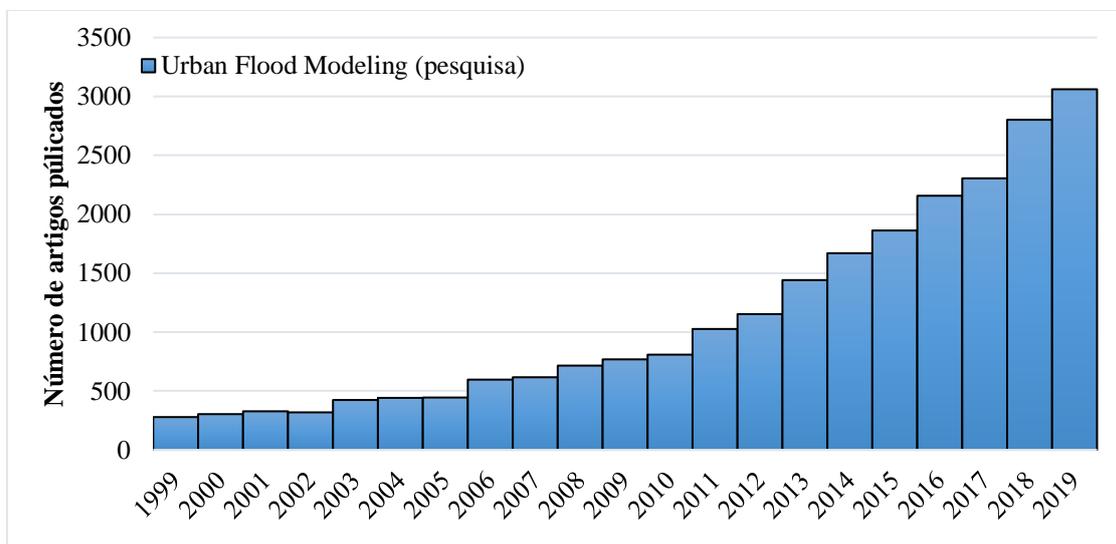


Figura 8 – Quantidade de artigos publicados no período de 1999 – 2019 sobre modelagem de alagamentos urbanos (*urban flood modeling*) /Base de Pesquisa: Base Science Direct/ Termo utilizado na busca: *Urban Flood Modeling*.

De acordo com Bach et al. (2014), os primeiros modelos de gestão de drenagem urbana, buscavam compreender o todo analisando os processos de forma independente. Com o passar do tempo, essa abordagem se tornou insuficiente para compreender as não linearidades do sistema, a variação espaço-tempo das chuvas, da topografia, do

desempenho dos sistemas de drenagem urbana, os processos locais de escoamento superficial e do fluxo de superfície influenciados por edifícios e outras características artificiais. Dessa forma, foram incorporadas novas abordagens, além da integração entre componentes e a/ou modelos visando melhor compreender a complexidade inerente ao ambiente urbano (BACH et al., 2014; GLENIS et al., 2018).

Os avanços no âmbito da modelagem em áreas urbanas permitiram simular processos que antes eram negligenciados, tais como: precipitação interceptada e acumulada em cima dos prédios, interações mais realistas rio / superfície / esgoto, transporte de poluentes, e bloqueios como edifícios ou carros (BACH et al., 2014; MIGNOT et al., 2018).

As novas abordagens contribuíram também para que surgissem novos desafios, no que concerne ao detalhamento dos dados de entrada, informações para calibração e validação dos modelos. Além disso, emergiu a necessidade de melhorar a representação das interações entre o fluxo superficial, os sistemas de drenagem urbana e a heterogeneidade espacial das características urbanas (WANG et al., 2018; BRUWIER et al., 2019; NKWUNONWO et al., 2020).

O nível de detalhamento da topografia de áreas urbanas exerce grande influência na dinâmica do fluxo superficial, quando pouco detalhadas mais difícil se torna a representação adequada das formas urbanas, principalmente dos edifícios e das ruas, que contribuem para o escoamento superficial (PAQUIER et al., 2015; BRUWIER et al., 2019).

A representação da troca de fluxo entre a superfície e o sistema de drenagem de águas pluviais era realizada de forma simplificada, não considerando a dinâmica do escoamento. Com o avanço dos modelos e as novas abordagem de modelos de rede de drenagem pluvial acoplados há modelos hidrodinâmicos, se tornou possível simular de forma simultânea e integrada processos hidrológicos e hidráulicos (JANG et al., 2018).

Apesar do avanço tecnológico, a carência de dados para calibração e validação dos modelos ainda é grande. Por se tratar de eventos rápidos e localizados, os recursos atualmente disponíveis, tais como técnicas de sensoriamento remoto, não podem ser facilmente utilizados, pois a maior parte dos dados gratuitos não possuem resolução temporal adequada para captar esses eventos. Para Wang et al. (2018) uma das formas de suprir essa falta de dados é a utilização de relatórios e mapas históricos.

Além disso, outros aspectos metodológicos ainda precisam ser melhorados. Por exemplo, o risco da população a partir de condições hidrodinâmicas, o comportamento

da água em relação aos edifícios (o potencial da chuva em causar danos a estrutura do edifício), o comportamento da onda de alagamento em relação a obstáculos em ruas sejam eles flutuantes ou dentro da coluna de água e o potencial de dano causado pelos alagamentos (LI et al., 2020).

2.2.3. TRABALHOS DE MODELAGEM DE ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO NO DF

O Distrito Federal é acometido todos os anos por alagamentos, causando tanto danos materiais e ambientais, como também perdas de vidas. As regiões administrativas com maior criticidade são: Plano Piloto, Vicente Pires, Ceilândia e Riacho Fundo 1 (BATISTA, 2014; PDSB-DF, 2017). Considerando o exposto, vem sendo produzido, trabalhos acadêmicos, que buscam compreender a dinâmica da rede de drenagem de águas pluviais e os seus pontos críticos, como também o impacto de medidas de mitigação.

Através das bases de dados disponíveis, tais como repositório de universidades (públicas e particulares) do DF, *Scielo*, *SciencDirect* e *ResearchGate* e Periódicos Capes foram compilados os trabalhos (TCC, Dissertações, Teses, Artigos de Periódicos e de Simpósios), que de alguma forma, se propuseram a investigar as possíveis causas dos alagamentos, propor medidas de controle e identificar os pontos críticos da rede de drenagem do DF. Esses trabalhos estão segmentados basicamente em três abordagens metodológicas, sendo elas: utilização de modelos matemáticos 1D, métodos empíricos e análises multicritérios, os quais estão compilados **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Quadro 4 – Compilação de trabalhos sobre alagamentos no DF, utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos.

| Autor | Tipo | Título | Área de estudo | Método |
|-----------------------|----------|---|----------------------------------|-----------------------|
| Barreto (2008) | Mestrado | Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal | Distrito Federal | Análise Multicritério |
| Cunha (2012) | TCC | Avaliação de risco de alagamento no Setor Habitacional Vicente Pires | Setor Habitacional Vicente Pires | Análise Multicritério |
| Costa (2013) | Mestrado | Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na Bacia do Lago Paranoá | Asa Norte / Plano Piloto | Modelagem |
| Batista (2014) | Mestrado | Cartografia geotécnica aplicada aos riscos de alagamento e inundação na Bacia do Rio São Bartolomeu | Bacia Do Rio São Bartolomeu | Análise Multicritério |
| Souza (2014) | Mestrado | Monitoramento e modelagem hidrológica da | Asa Norte / Plano Piloto | Modelagem |

| Autor | Tipo | Título | Área de estudo | Método |
|---|-------------|--|----------------------------|-----------------------|
| | | sub-bacia do Lago Paranoá - Brasília/DF | | |
| Adorno & Rodrigues (2015) | TCC/Artigo | Análise do sistema de drenagem / Setor Habitacional D Sul – Taguatinga | Taguatinga | Métodos Empíricos |
| Braga (2016) | TCC | Alagamentos e inundações em áreas urbanas: Estudo de caso na cidade de Santa Maria - DF | Santa Maria | Análise Multicritério |
| Bezerra e Dourado (2016) | TCC/Artigo | Alagamentos em Taguatinga Norte: Análise da situação e proposta de um sistema de drenagem de águas pluviais entre A Avenida Hélio Prates e o Parque do Cortado | Taguatinga | Métodos Empíricos |
| Pinto, Costa & Alves (2017) | Simpósio | Modelagem da drenagem urbana – estudo de caso na rede da Asa Norte, Brasília-DF | Asa Norte / Plano Piloto | Modelagem |
| Bayma et al., (2017) | Artigo | Análise de Susceptibilidade a Alagamento na Bacia Hidrográfica Do Riacho Fundo – Distrito Federal por meio de sistemas de Informação Geográfica – SIG | Riacho Fundo | Análise Multicritério |
| Silvia et. al., (2017) | Simpósio | Modelagem da drenagem urbana – estudo de caso na sub-bacia da Asa Sul-DF | Asa Sul / Plano Piloto | Modelagem |
| Silvia, Costa & Alves (2017) | Simpósio | Avaliação da eficiência de bacias de retenção– Setor Habitacional Taquari – DF | Setor Habitacional Taquari | Modelagem |
| Fileni, Costa & Alves (2017) | Simpósio | Modelo de drenagem urbana-aplicação de técnicas de drenagem sustentável em quatro sub-bacias na Região Administrativa De Ceilândia-DF | Sol Nascente/Pôr do Sol | Modelagem |
| Silva & Carvalho (2017) | TCC/Artigo | Sistema de drenagem das quadras QSE Taguatinga Sul/DF: Estudo preliminar e propostas de medidas de controle | Taguatinga | Métodos Empíricos |
| Teixeira & Costa (2017) | TCC/Artigo | Análise da drenagem na SQN 716 - Brasília-DF e propostas de medidas de controle | Asa Norte / Plano Piloto | Métodos Empíricos |
| Araújo (2018) | TCC | Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte-DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica | Lago Norte | Modelagem |

| Autor | Tipo | Título | Área de estudo | Método |
|---|-------------|---|------------------------------------|-------------------|
| Fileni, Costa & Alves (2018) | Encontro | Avaliação de técnicas de drenagem sustentável em duas sub-bacias do Setor Habitacional Sol Nascente, Ceilândia-DF | Sol Nascente/Pôr do Sol /Ceilândia | Modelagem |
| Sales (2018) | TCC | Metodologia para definição de projeto para um sistema de drenagem pluvial urbana sustentável com estudo de caso | Asa Norte / Plano Piloto | Métodos Empíricos |
| Maia & Pereira (2018) | TCC/Artigo | Estudo do sistema de drenagem urbana na Região Administrativa Do Riacho Fundo I – DF | Riacho Fundo I | Métodos Empíricos |
| Paranayba et al., (2019) | Simpósio | Modelagem da drenagem urbana no distrito federal - estudo de caso do reservatório de detenção do Guará | Guará | Modelagem |
| Araújo, Costa e Koide (2019) | Simpósio | Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte/DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica | Lago Norte | Modelagem |
| Ceolin et. al., (2019) | Simpósio | Estudo hidráulico-hidrológico de uma bacia de detenção em Vicente Pires | Setor Habitacional Vicente Pires | Modelagem |
| Delci, Costa & Koide 2019 | Simpósio | Estudo de implantação de sistemas de drenagem sustentável em Santa Maria -DF | Santa Maria | Modelagem |
| Marques, Costa e Koide (2019) | Simpósio | Manejo De Águas Pluviais: estudo da rede de drenagem e de soluções de baixo impacto na Região Administrativa Candangolândia | Candangolândia | Modelagem |
| Rocha (2019) | Doutorado | Paisagem urbana integrada às técnicas compensatórias de drenagem: Solução para os alagamentos em Brasília | Asa Norte / Plano Piloto | Modelagem |
| Borges, Costa & Alves (2019) | Simpósio | Estudo para implantação de técnicas de drenagem sustentável na Região Administrativa Guará II do Distrito Federal | Guará II | Modelagem |
| De Paula, Costa & Koide (2019) | Simpósio | Monitoramento hidrológico de uma lagoa de detenção no Guará/DF | Guará | Modelagem |
| Fileni, Costa e Alves (2019) | Artigo | Aplicação de LIDs na região de Cerrado para mitigação de áreas alagadas | Ceilândia | Modelagem |

Dos 28 trabalhos apresentados, 17 utilizam algum modelo matemático para analisar a rede de drenagem pluvial ou avaliar cenários com a implantação de algum tipo de técnica compensatória para o amortecimento da vazão.

Apesar dos trabalhos apresentados não serem aplicados a toda região administrativa o qual está inserida, é possível dizer que em todo o DF existe algum tipo de estudo relacionado a alagamento e análise da rede de drenagem, independentemente do método aplicado (Figura 9 e Figura 10).

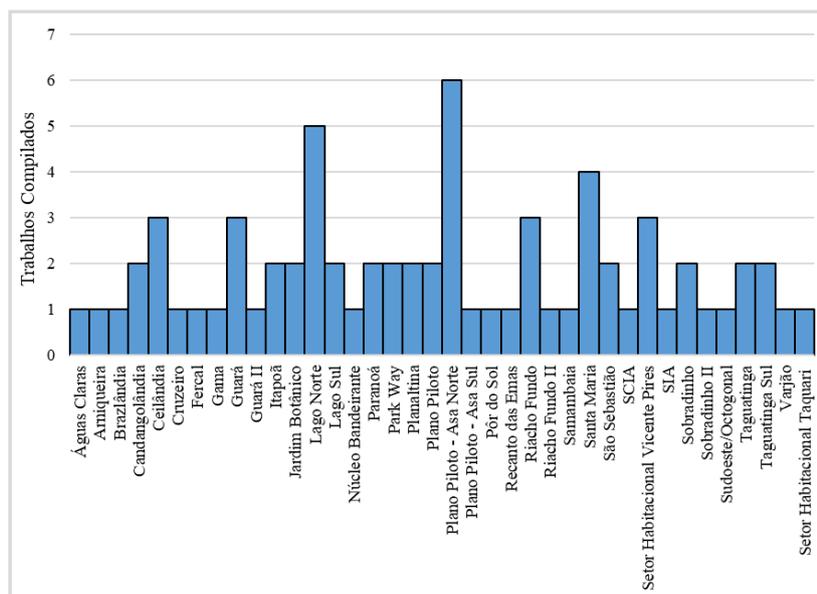


Figura 9 – Quantidade de trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, por Região Administrativa, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos.

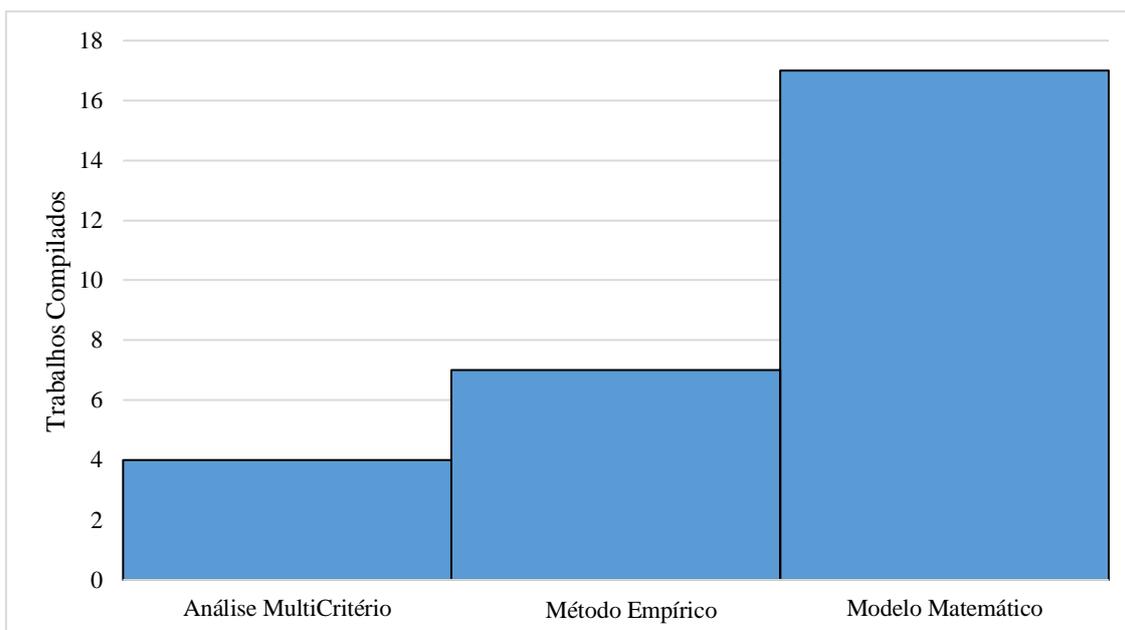


Figura 10 - Métodos mais utilizados nos trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos.

A Figura 11 apresenta os locais que foram utilizados como áreas de estudos (mapa principal), nos trabalhos compilados no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** E no mapa de detalhe, é dado em enfoque nas áreas do Plano Piloto (Asa Norte e Sul) que utilizaram modelos matemáticos.

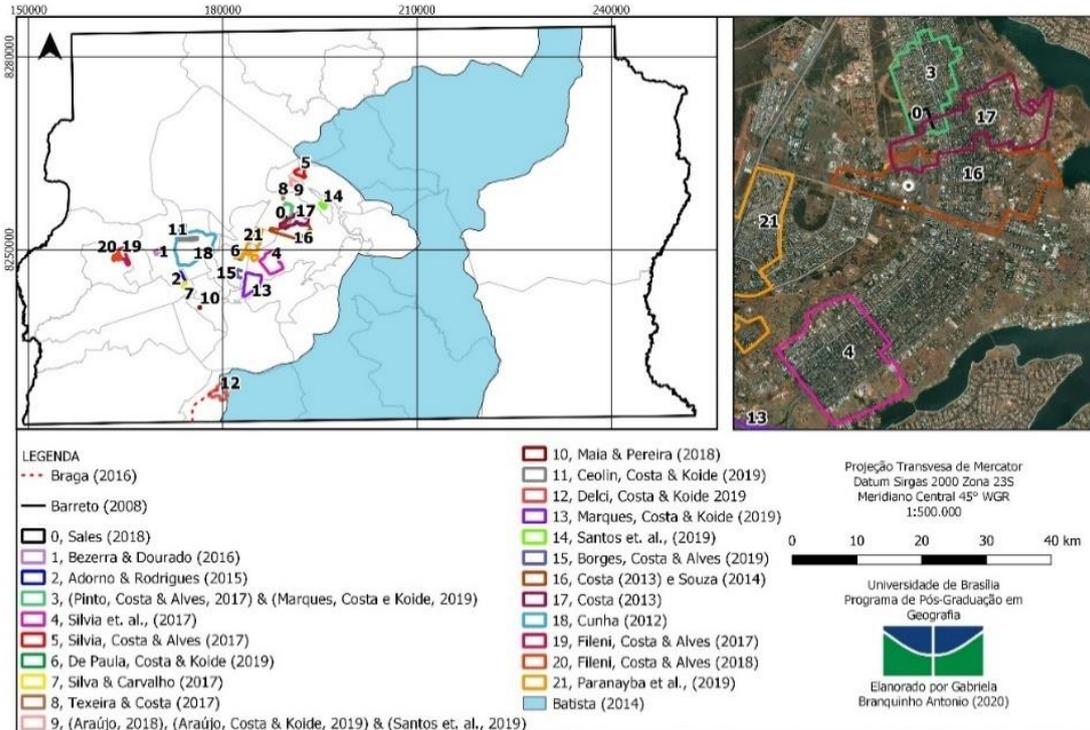


Figura 11 - Mapa de localização das áreas de estudo, dos trabalhos sobre alagamentos e rede de drenagem de águas pluviais no DF, compilados utilizando repositório de universidades e plataformas de buscas artigos.

Diante do que foi exposto, percebe-se que a maioria dos trabalhos encontrados utilizam um dos dois modelos matemáticos, sendo eles: o SWMM ou o PCSWMM, ambos para estudos de rede drenagem pluvial. Estes estudos possibilitando a indicação de trechos críticos da rede, disponibilizam dados sobre velocidade do escoamento nos condutos, volume total de entradas pelos poços de visita (PV) e, o escoamento das áreas de contribuição, mas não fornecem dados sobre a mancha de alagamento, altura da lâmina de água e velocidade em superfície.

Dessa forma, em ambos os métodos supracitados são fornecidos dados de pontos de conexão ou de entrada de água que ficaram totalmente inundados. Desta forma, funcionam como indicativo de que nesses locais ocorrem alagamentos, todavia, sem caracterizar e delimitar realmente a mancha alagada.

2.3. MAPEAMENTO COLABORATIVO E DADOS CIDADÃOS

2.3.1. CROWDSOURCING

O conceito de crowdsourcing está associado à ideia de que uma determinada atividade ou função que antes era realizada por uma única empresa ou instituição passa a ser realizada por uma rede indefinida de pessoas. De forma simplificada, pode-se dizer que é o ato de obter informações, ideias e serviços de forma voluntária a partir de um grupo (ERSKINE e GREGG, 2012; APFM, 2017).

Apesar de parecer um conceito essencialmente novo, a concepção associada à coleta, validação e geração de dados com base no cidadão não é recente. De Longueville et al. (2010) citam como exemplos de antigos crowdsourcing a contagem anual de pássaros nos Estados Unidos no ano de 1900 e a pesquisa britânica de uso da terra nos anos 1930.

Atualmente, diante do avanço tecnológico de ferramentas que possibilitam a obtenção de dados, principalmente em tempo real, vem surgindo a discussão sobre a utilização desses dados para subsidiar o monitoramento ou criar bases de dados quando não há dados existentes. Essa forma de obtenção e os tipos de dados adquiridos são conhecidos como crowdsourcing, informações geográficas voluntárias (VGI) ou dados cidadãos. Nessa pesquisa, será adotado o termo dados cidadãos.

A obtenção de dados cidadãos vem emergindo nos últimos anos como uma fonte de dados espaciais produzida e disponibilizada por cidadãos comuns por meio de diferentes atividades de colaboração (SOUZA et al., 2019). Os cidadãos com algum tipo de acesso à internet são entendidos como sensores móveis, que são capazes de produzir e compartilhar informações podendo ser constantemente atualizadas (KANKANAMGE et al., 2019; ZENG et al., 2020).

Desta forma, os dados cidadãos podem ser considerados um método e uma fonte conveniente e relativamente confiável para realizar o monitoramento de larga escala e se encaixam na conceituação de código aberto, por se tratar de informações que estão acessíveis e disponíveis a todos (HULTQUIST e CERVONE, 2020).

De acordo com Albuquerque et al. (2016), os dados cidadãos podem apresentar três categorias em função da obtenção da informação:

- a) Mídia social: informações produzidas por pessoas sobre um evento, normalmente associada a plataformas de rede social, que trocam e disseminam informações sobre um evento de desastre;

- b) Sensor de multidões: informações coletadas de aplicativos dedicados e plataformas que visam especificamente produzir informações para o gerenciamento de riscos de desastres;

Mapeamento colaborativo com informações sobre infraestruturas e equipamentos públicos, como o caso do *OpenStreetMap* e plataformas onde é possível cadastrar ocorrência de eventos, como inundações fluviais, alagamentos e processos erosivos, e problemas nas infraestruturas e equipamentos públicos;

Por se tratar de um conjunto de dados obtidos por diversas fontes, por intermédio da colaboração dos cidadãos, algumas questões são levantadas quanto à subjetividade e à confiabilidade dos dados (DEGROSSI et al., 2014). Machado e Camboin (2019) ressaltam a necessidade de criar métodos que possibilitem avaliar a qualidade dos dados obtidos. Como o dado cidadão tem como pressuposto a percepção do cidadão mediante ao evento ocorrido, a qualidade não pode ser estritamente avaliada com critérios objetivos.

Alguns métodos podem ser utilizados em grandes plataformas de mapeamento colaborativo para minimizar a incerteza e a subjetividade dos dados cidadãos. O primeiro ponto seria desenvolver uma forma de padronizar o dado, solicitando requisitos mínimos que viabilizem construir a base de dados. Esses requisitos serviriam como filtros, descartando os dados que não se enquadram.

De acordo com Oliveira (2021), podem ser aplicadas algumas métricas de qualidade, buscando mensurar um conjunto de atributos embasados por normas técnicas de avaliação e padronização de dados espaciais, como definido pela ISO 19157, compondo essa abordagem, a acurácia posicional, acurácia temática, completude, qualidade temporal, consistência lógica e usabilidade.

Existem ainda indicadores de qualidade, relacionados à consistência e/ou credibilidade do dado, que não se dão na perspectiva normativa como na abordagem anterior. Já a validação desses dados poderia seguir também a "validação cruzada" com dados de maior nível de confiabilidade. Diante do explicitado nos parágrafos anteriores, De Longueville et al. (2010) apontam que uma forma de qualificar a informação obtida é por meio da noção de credibilidade. De acordo com os autores, essa noção de credibilidade é entendida "como uma noção subjetiva que descreve se uma informação pode ser acreditada ou não", ou seja, um dado pode ter mais ou menos credibilidade em

função do nível e da quantidade de dados confiáveis que uma plataforma de colaboração pode obter.

2.3.2. EXPERIÊNCIAS COM DADOS CIDADÃOS COM INUNDAÇÕES FLUVIAIS E ALAGAMENTOS

Atualmente, um dos grandes desafios em trabalhar com modelagem bidimensional para identificação de áreas acometidas por alagamentos, em diversos países, está na falta de disponibilidade de dados para as etapas de calibração e validação dos modelos (ZENG et al., 2020).

Dentre os dados mais necessários, temos a distribuição espacial da mancha, a altura da lâmina de água e a velocidade do escoamento. Há também outras informações que são importantes para simular os eventos de alagamento, tais como a duração e os horários estimados de início e término desses eventos.

Apesar de ser um problema que acomete diversos países, fica mais evidente em países em desenvolvimento. Isto se deve à falta de um monitoramento adequado das bacias hidrográficas, principalmente em escala local, em ambientes urbanos e em processo de urbanização.

Embora haja incerteza associada aos dados cidadãos, o potencial dessa informação é inegável, principalmente considerando o volume de informação que pode ser gerado em áreas urbanas (GUNTHA e RAO, 2018).

Os dados cidadãos podem desempenhar um importante papel na maioria das fases do ciclo de desastres (DE LONGUEVILLE et al., 2010; APFM, 2017): nas etapas de Prevenção e Preparação (antes do evento ocorrer) e na recuperação (após o evento).

Além disso, a partir da compilação de dados históricos, é possível entender a abrangência e magnitude dos eventos e os impactos decorrentes, que poderão ser utilizados para a calibração de modelos de previsão.

Um exemplo disso foi a reconstrução de um evento de inundação em Newport Beach, na Califórnia. Nesse evento, foi realizada a reconstrução a partir de uma coleção de 85 fotografias digitais e relatórios de testemunhas oculares. No Reino Unido, o mesmo ocorreu através de fotos de reportagens de jornais, sendo possível catalogar evidências de um evento de tempestade ocorrido (WANG et al., 2018).

O uso de redes sociais com publicações de fotos pode facilitar a obtenção situacional dos locais afetados. Algumas plataformas de mapeamento colaborativo e,

consequentemente, a obtenção de dados de cidadãos vem sendo amplamente utilizadas. O openstreetmap.org é amplamente utilizado para a obtenção de dados de infraestrutura e equipamentos públicos. Foi utilizado por Gebremedhin et al. (2020) para elaborar um modelo de inundação/alagamento urbano, além de ter sido utilizado durante o terremoto que atingiu o Haiti em 2010 (ALBUQUERQUE et al., 2016).

Na Alemanha foi desenvolvido uma ferramenta, Post-Distiller, capaz de filtrar tweets que relatam a altura das inundações, possibilitando a construção de um mapa de probabilidade na escala da local urbana (ZENG et al., 2020).

No Brasil, podemos citar o aplicativo Alaga SP e o mapweb pontos de alagamento (<https://pontosdealagamento.crowdmap.com>), onde é possível inserir informações acerca de ruas e avenidas estão alagadas na cidade de São Paulo, quase que em tempo real (HIRATA et al., 2013). No Distrito Federal existe o Portal do Território Resiliente (https://www.geoservicos.segeth.df.gov.br/territorio_resiliente/) em que, é possível cadastrar diversos tipos de ameaça ao território, sejam elas naturais ou antrópicas (SEDUH, 2021).

2.3.3. DADOS CIDADÃOS COMO UMA ALTERNATIVA PARA A COMPILAÇÃO DE DADOS DE ALAGAMENTOS

Em diversos países, a adoção de um banco de dados estruturado e especializado com eventos históricos de inundação e alagamentos é uma exigência. Bathrellos et al. (2018) expõem que na Europa existe uma legislação relativa à inundação (Directive 2007/60/EC), de modo que é exigido a construção de uma base de dados histórica de inundações, objetivando realizar uma avaliação preliminar de risco de cheias.

Moy de Vitry e Leitão (2020), visando obter dados para a calibração de modelos de alagamentos, utilizaram imagens de uma câmera de vigilância para monitorar o nível de água. Estas imagens serviram para a validação dos dados com sensores convencionais, obtendo maior confiabilidade no modelo de alagamento utilizado.

Embora haja subjetividade na forma de aquisição de dados, como explanado acima, a utilização de meios de comunicação, tais como redes sociais e jornais de notícias, já são abordagens conhecidas e reconhecidas. São exemplos de estudos que adotaram essa abordagem Santos e Paula (2021), que coletaram informações disponíveis na hemeroteca do Jornal O Povo, de modo que conseguiram identificar os principais pontos de

alagamento na microbacia do riacho Pajeú em Fortaleza - CE, utilizando uma série histórica de 18 anos (2001 e 2019), sendo contabilizadas 152 ocorrências de alagamentos.

Santos e Carvalho (2021) coletaram informações de duas fontes, sendo a primeira os dados disponibilizados pelo Corpo de Bombeiros de Ponta Grossa para o período de 2005 a 2017, contendo um total de 37 ocorrências de alagamentos, e a segunda foram dados coletados através do acervo do Jornal da Manhã, sendo obtidas 23 ocorrências de enchentes e alagamentos no período de 1980 a 2004.

Vestena et al. (2020) compilaram a ocorrência de alagamentos no Município de Guarapuava no Paraná, contida no banco de dados do Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná, para o período de 2005 a 2011, totalizando 67 ocorrências. Também foram utilizadas outras fontes para a compilação da informação em questão, sendo elas jornais locais e estaduais de notícias.

Lima et al. (2019) realizaram um levantamento histórico de registros de alagamentos ocorridos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, entre os anos de 2013 e 2018, através de notícias em jornais locais, publicações em redes sociais e inspeções in loco. Foi realizada uma sobreposição entre os pontos de alagamentos, as áreas de depressões e as áreas de fluxo acumulado.

Gaitan et al. (2015) elaboraram um banco de dados espacializado sobre os incidentes de inundação em uma área urbana em Roterdão, na Holanda, utilizando transcrições de relatórios telefônicos sobre inundações pluviais feitos por habitantes. Neste estudo, foram disponibilizados 38.657 relatórios feitos de 2004 a 2011, os quais incluíam campos que descreviam o bairro, nome da rua, número da casa, breve descrição do incidente de inundação e datas de notificação e resolução de problemas. Alguns relatórios não possuíam endereços e número de residência, o que resultou em um conjunto de dados final de 25.958 relatórios.

Outros trabalhos, como Nunes (2007), Maia (2009), Escobar e Demeritt (2012), Ahmed e Sinnappan (2013), Batista (2014), Devitt e O'Neill (2016) e Adekola e Lamond (2018), foram desenvolvidos demonstrando a potencialidade desses dados e como podem ser utilizados para conhecer o território.

2.4. MODELO FLO-2D

O FLO-2D é um modelo bidimensional de diferenças finitas, que foi idealizado para propagar fluxos não newtonianos. O escoamento é propagado para outros elementos da grade do domínio computacional, com base na topografia, rugosidade e obstruções (FLO-2D, 2018). Um dos principais objetivos é estimar a faixa provável dos alagamentos e inundações, bem como as propriedades do fluxo, como a velocidade e a altura da lâmina de água (O'BRIEN et al., 1994).

O modelo possui uma variedade de aplicações, sendo possível simular a precipitação, infiltração, evapotranspiração, escoamento de canais fluviais modificados ou não, escoamento superficial, rompimento de barragens (água e lama), transporte de sedimentos, sistema de drenagem de águas pluviais, *Best Management Practices* (BMP) e outros recursos (FLO-2D, 2018).

Como citado no parágrafo anterior, o modelo FLO-2D possui diversas potencialidades, contudo, vem sendo mais utilizado para simular fluxos de detritos e inundações fluviais. O Quadro 4 apresenta um breve compilado de trabalhos que utilizaram o FLO-2D.

Quadro 4 – Breve compilação de trabalhos e o fenômeno estudado, utilizando o modelo FLO2D.

| Autor | GRID (m) | Área (km ²) | Fenômeno | Tipo de Trabalho |
|------------------------------------|----------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| (GOMES et. al., 2013) | 10 | 5 | Fluxo de Detritos | Artigo |
| (D'AGOSTINO; TECCA, 2006) | 5 | 2.87 | Fluxo de Detritos | Simpósio Internacional |
| (CALLIGARIS; BONIELLO; ZINI, 2008) | - | - | Fluxo de Detritos | Artigo |
| (LIN; LEE; CHANG, 2011) | - | 3.75 | Fluxo de Detritos | Artigo |
| (ADEGBE et. al., 2013) | 10 | 5.35 | Fluxo de Detritos | Artigo |
| (ROCHA; KOBIYAMA; MICHEL, 2014) | 10 e 20 | 16,3 | Fluxo de Detritos | Simpósio Nacional |
| (ERENA; WORKU; DE PAOLA, 2018) | 30 | - | Inundação Fluvial | Artigo |
| (DASALLAS; LEE, 2019) | 20 | - | Inundação Fluvial | Artigo |
| BRANQUINHO et. al., (2019) | 30 | | Fluxo de Detritos | Simpósio Nacional |
| (CRUZ et al., 2020) | - | - | Inundação Fluvial | Artigo |
| (NEGLIA et al., 2021) | - | - | Fluxo de Detritos | Artigo |

2.4.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES

O FLO-2D utiliza a equação de conservação de volume, em que o roteamento de alagamento ocorre em duas dimensões, sendo realizado pela integração numérica das equações de movimento e conservação do volume.

De modo que, a equação de continuidade é uma equação fundamental da mecânica dos fluidos que afirma que a massa que entra em um determinado volume de fluido é igual à massa que sai. Possibilitando compreender como o fluido se comporta em diferentes situações.

A equação de quantidade de movimento é outra equação fundamental da mecânica dos fluidos que descreve como a força que atua sobre um fluido afeta sua velocidade e movimento. Essa equação é usada para calcular a pressão, a velocidade e a direção do fluxo de fluidos em diferentes situações.

As equações de continuidade e quantidade de movimento, que governam as tarefas do modelo (Eq. 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) (O'BRIEN et al., 1994; FLO-2D, 2018).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

Eq. 1

Onde: h é a profundidade do fluxo; V é a velocidade média da profundidade em uma das oito direções de fluxo x; i é a intensidade da precipitação; Sf é o componente de declive de atrito, baseado na equação de Manning; So é gradiente de pressão da inclinação do leito.

Para a planície de inundação/alagamento as equações de movimento são aplicadas calculando a velocidade média do fluxo através de um elemento de grade (oito direções de fluxo em potencial).

Cada cálculo de velocidade é unidimensional e resolvido independentemente das outras sete direções. Como o fluxo está sendo compartilhado com todos os vizinhos de um determinado elemento da grade, a resolução dos vetores de velocidade não é necessária (Figura 12). A estabilidade desse esquema numérico explícito é baseada em critérios rígidos para controlar a magnitude do passo computacional variável.

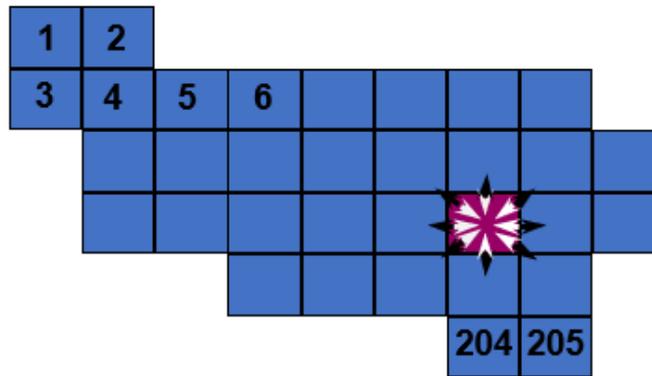


Figura 12 - Cálculo de velocidade nas oito direções, em uma malha numérica.

2.4.2. INTEGRAÇÃO FLO2D E SWMM

O FLO-2D permite a troca de fluxo de águas superficiais com um sistema de drenagem pluvial através de um fluxo contínuo. Para isso, o modelo pode simular um sistema de drenagem pluvial de conduíte fechado, como o *Stormwater Management Model* (SWMM).

Neste módulo, ambos os modelos funcionam simultaneamente como um único motor, compartilhando dados em uma base de tempo computacional controlada pelo mecanismo de água de superfície do FLO-2D (FLO-2D, 2017; GONZALEZ-RAMIREZ et al., 2018). O modelo conceitual completo do FLO-2D integrado ao SWMM, como um componente de drenagem pluvial, pode ser observado na Figura 13.

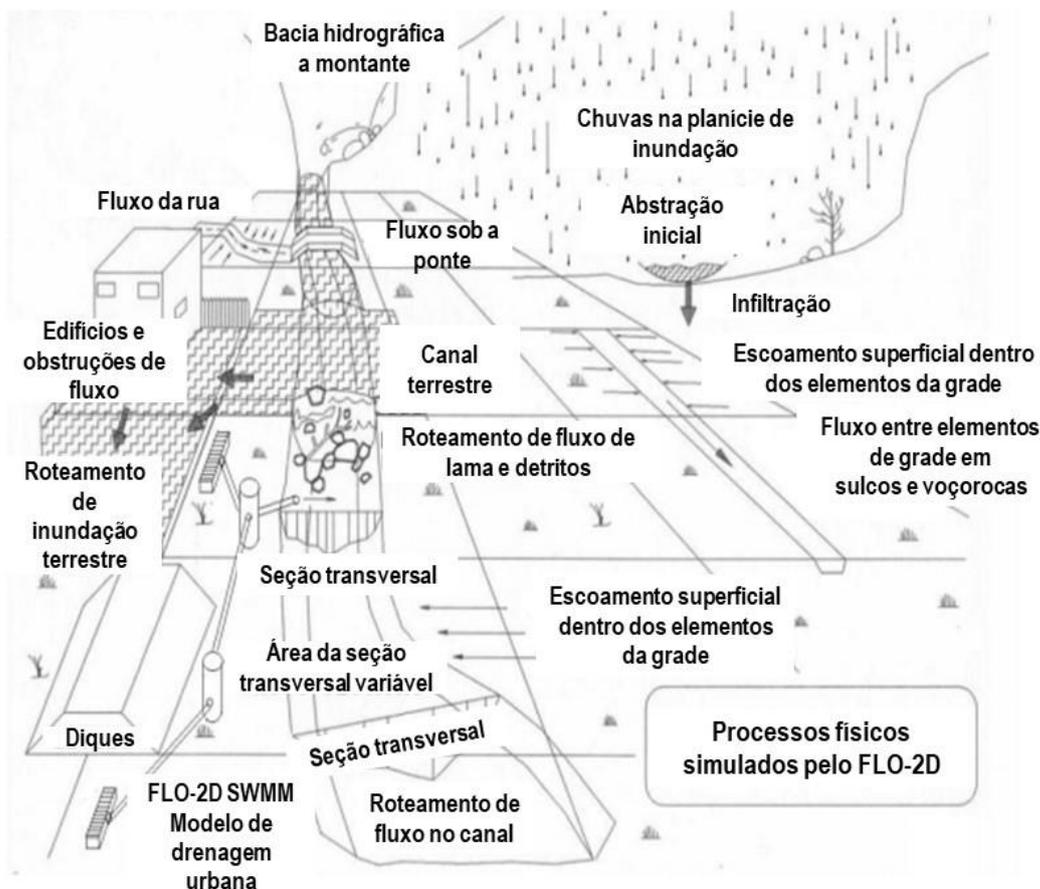


Figura 13 – Esquema Conceitual do Modelo FLO-2D integrado do modelo SWMM.

Fonte: Adaptado de FLO-2D (2017).

O modelo FLO-2D calculará a descarga de entrada de drenos pluviais com base na geometria da entrada e nas elevações previstas da superfície da água e no potencial fluxo de retorno.

Esse cálculo é feito pelo sistema de águas de superfície em função da elevação da superfície da água (WSE) e da pressão do dreno. A descarga de entrada calculada é encaminhada para a rede de drenagem pluvial, e o fluxo de retorno é trocado através de entradas e saídas do sistema de drenagem pluvial (FLO-2D, 2017).

Os dados da rede de drenagem urbana são inseridos no modelo FLO-2D a partir do componente "dreno de tempestade" (*Storm Drain*), que deve ter as mesmas informações que são requeridas pelo modelo SWMM. Os componentes relacionados à dinâmica em superfície, como a precipitação, infiltração e as áreas de contribuição/sub-bacias (subcatchments), não precisam ser adicionados ao projeto SWMM, pois já estão representados no modelo FLO-2D.

As áreas de contribuição são representadas através dos elementos da malha onde há alguma entrada, junção ou saída da rede de drenagem pluvial (Figura 14).

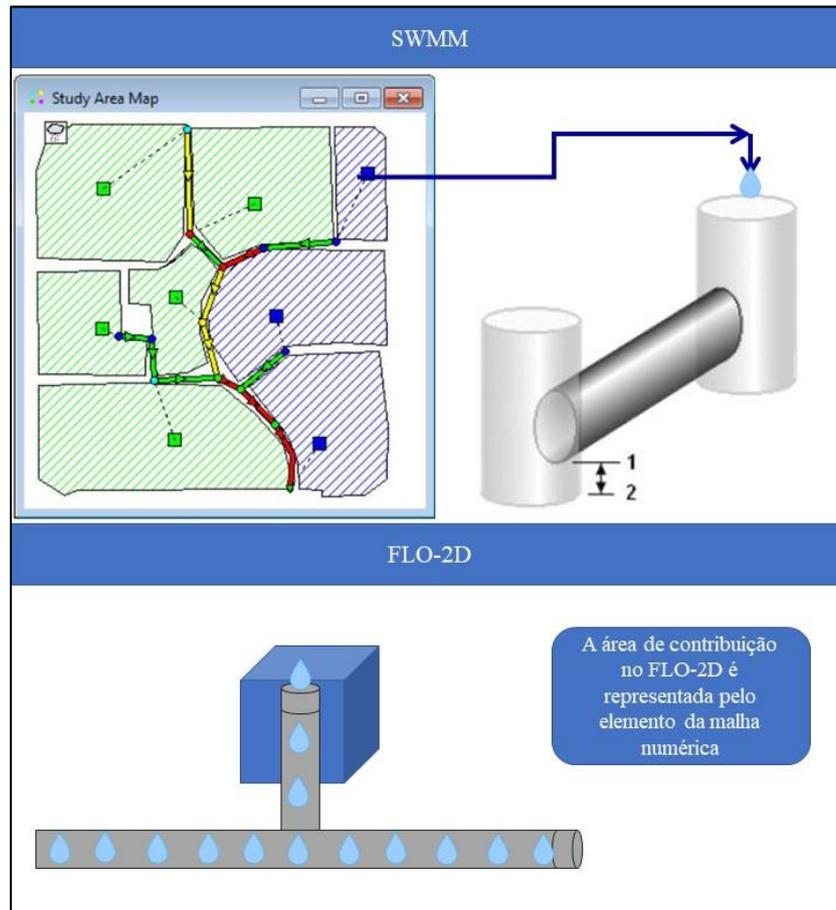


Figura 14 – Representação das áreas de contribuição/sub-bacias no modelo SWMM e no modelo FLO-2D.

Fonte: Adaptado de FLO-2D (2017).

2.4.3. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Suscintamente, de acordo com FLO-2D (2021), a solução numérica para o roteamento de fluxo em superfície:

- a) A forma diferencial das equações de continuidade e momento no modelo FLO-2D são resolvidas utilizando o esquema numérico de diferença finita, o algoritmo explícito resolve a equação do momento para a velocidade do fluxo através do limite do elemento da grade, um elemento por vez;
- b) O domínio computacional (área de estudo) é discretizado através de uma malha de cálculo estruturada quadrática e uniformes. Todos os cálculos relacionados ao fluxo de superfície são realizados em cada um dos limites nas oito direções de fluxo em potencial;
- c) Parâmetros hidráulicos, como resistência ao fluxo (valor n de Manning), área de fluxo, declive, elevação da superfície da água, perímetro úmido e profundidade são calculados, utilizando uma estimativa linear entre os dois elementos da grade que compartilharão a descarga em uma das oito direções, para que seja calculado a velocidade do fluxo;
- d) A velocidade do fluxo (variável dependente) através do limite é calculada a partir da solução da equação do momento;
- e) A vazão para cada passo temporal é calculada pela multiplicação da velocidade pela área de vazão entre dois elementos;
- f) A estimativa da velocidade do fluxo no limite de um elemento da grade é calculada com a equação da onda difusiva. Essa primeira estimativa é usada no método de *Newton-Raphson* para resolução da equação de onda dinâmica completa. Caso a solução de *Newton-Raphson* falhe ao convergir após 3 iterações o algoritmo será padronizado para a solução de ondas difusivas;
- g) A descarga é calculada através do limite do elemento da grade multiplicando a velocidade pela área de fluxo da seção transversal para todas as oito direções. Para determinar a variação profundidade do fluxo para cada passo temporal, a soma da descarga nas oito direções de fluxo é multiplicada pelo passo em tempo em questão e dividida pela área de superfície disponível; e

- h) São verificados os critérios de estabilidade numérica, caso algum critério seja excedido o tempo de simulação reinicia-se para o anterior, por conseguinte, o incremento de tempo é reduzido e reinicia-se todos os cálculos novamente.

2.5. GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT (GPM)

Devido à heterogeneidade da precipitação e à densidade espacial desigual da rede de monitoramento de precipitação por estações pluviométricas em solo, o uso de produtos de precipitação por satélite (SPPs) apresenta-se como uma abordagem promissora. Isso ocorre porque esses produtos possibilitam o monitoramento dos eventos de maneira quase em tempo real, auxiliando a compreensão dos processos de precipitação (JIANG e BAUER-GOTTWEIN, 2019).

Essa abordagem é uma alternativa ao monitoramento em superfície feito por meio dos pluviômetros, que podem apresentar problemas relacionados a falhas de medição, além de estarem sujeitos a diversos tipos de avarias. Desse modo, métodos de sensores remotos vêm ganhando destaque, como o uso de radares meteorológicos e estimativas por sensores satélites.

Nos últimos anos, muitos produtos de precipitação por satélite com várias resoluções temporais e espaciais foram desenvolvidos e divulgados ao público. Destacam-se o Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), a Análise de Precipitação por Satélite (TMPA), a análise da técnica MORPHing do Climate Prediction Center (CMORPH), a Estimativa de Precipitação de Informações Remotamente Sensíveis usando Redes Neurais Artificiais (PERSIANN), o Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMap) e o Global Precipitation Measurement (GPM) (CARACCILO et al., 2018).

O Global Precipitation Measurement (GPM) foi lançado no início de 2014 e se apresenta como a próxima geração de sensores. Este sistema possui os produtos globais mais avançados referentes à precipitação, além de algoritmos de recuperação aprimorados, que mesclam estimativas de precipitação de Micro-ondas Passiva - PMW e Infravermelho - IR (NASA-GPM, 2023).

O GPM possui como objetivo principal coletar informações sobre a variação pluviométrica, a fim de melhor compreender o ciclo da água. Por se tratar de uma constelação de satélites, as medições do GPM podem ser combinadas com outros dados para melhorar sua precisão e confiabilidade. Um exemplo disso é a utilização de abordagens que usam dados de umidade do solo por satélite para recuperar e/ou corrigir os dados de precipitação (NASA-GPM, 2023).

O algoritmo IMERG, possui 4 versões (V3, V4, V5 e V6), fornece três níveis de produtos relacionados à precipitação sendo eles, o *Late* (denominado IMERG-L), o *Early* quase em tempo real (denominado IMERG-E) e o *Final Run* em tempo real (denominado IMERG-F), com uma resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (10 km) e resolução temporal de 30 min (NASA-GPM, 2023).

O texto parece estar bem escrito e não apresenta erros graves de gramática ou ortografia. No entanto, sugiro algumas pequenas correções e ajustes para melhorar a fluidez e clareza do texto:

O produto Final Run (Execução Final) é amplamente usado em pesquisas de hidrologia e clima, pois é calibrado com os dados de monitoramento do Global Precipitation Climatology Center (GPCC), cuja fonte é o Sistema Global de Telecomunicações (GTS), que coleta dados de cerca de 7000 estações em todo o mundo.

Embora o GPM forneça um produto já calibrado, atualmente uma grande diversidade de trabalhos vem sendo desenvolvidos para avaliar a capacidade de precisão do GPM em condições diferenciadas, tais como diferentes regiões climáticas, topológicas, urbanas e rurais, com escalas regionais e locais.

Diversos autores, como Caracciolo et al. (2018), Maggioni e Massari (2018), e Jiang e Bauer-Gottwein (2019), apontam que o desempenho dos produtos de precipitação do GPM é regionalmente dependente de fatores como topografia, variação climática, intensidade e volume da precipitação. Isso mostra que a precisão do que é estimado pelo GPM em relação à estação pode variar localmente (BECK et al., 2017; MAGGIONI et al., 2018).

Fang et al. (2019) observam que questões climáticas e topográficas afetam a variação das estimativas de precipitação do GPM. No entanto, os autores observaram alta consistência com medições de máximas anuais e precipitações extremas anuais.

Satgé et al. (2018) analisaram a capacidade do IMERG (versões v03, v04 e v05) utilizando escalas mensal e diária. Considerando a escala mensal, os autores obtiveram estimativas precisas com correlações superiores a 0,9 para toda a região do Paquistão, incluindo diferentes regiões climáticas, úmidas, áridas e extremamente áridas. Na escala diária, o desempenho foi melhor para as regiões úmidas e áridas.

Os autores observaram ainda que algumas versões do IMERG apresentam estimativas melhores do que outras, dependendo da região climática. No Paquistão, para as regiões climáticas úmidas e áridas, o IMERG-v05 apresenta melhores resultados,

enquanto para a região extremamente árida, o IMERG-v04 apresenta um desempenho melhor do que o IMERG-v05. De maneira geral, foi observada uma tendência de superestimação por parte do IMERG em todas as regiões climáticas analisadas.

Teodoro et al. (2020) utilizou dados diários de precipitação em uma bacia hidrográfica no Sudeste do Brasil, caracterizada por ser uma região de relevo muito movimentado. Quando analisadas as estatísticas de contingência, os autores indicam que o IMERG apresenta um melhor desempenho para os intervalos de precipitação de 10-50 mm/dia. Contudo, ao avaliarem os valores de Correlação de Pearson (CP) e Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2) para o intervalo de 10-50 mm/dia, os autores observaram uma predominância de baixos valores de correlação e de coeficiente de ajuste. Dos 13 pontos apresentados, somente 3 apresentam CP maior que 0,5 e somente um apresenta R^2 igual a 0,5.

De maneira geral, os autores indicam que o relevo tem potencial para interferir nas estimativas do IMERG. Considerando os resultados obtidos, concluem que o IMERG possui pouca habilidade em estimar eventos de precipitação e não recomendam sua utilização nos meses de verão. Reportam ainda que se faz necessária a avaliação de bacias distintas.

Gadêlha (2018) analisou as estimativas do GPM considerando três níveis de análise (pixel x pixel, médias nacionais e as cinco regiões do Brasil). Em todos os casos, foram avaliadas as escalas diárias, mensais e anuais. Em todos os níveis de análise, o autor observou uma tendência de superestimação por parte do GPM em relação à estação pluviométrica, em alguns pixels na região Centro-Oeste.

De maneira geral, em todas as categorias de análise, as escalas temporais mensais e anuais tendem a apresentar resultados mais satisfatórios do que a escala temporal diária. Contudo, ao avaliar a escala temporal diária, o autor observou que considerando a análise pixel a pixel, a região Centro-Oeste e o Sudeste apresentaram bons resultados em testes estatísticos como Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR) e Índice de Sucesso Crítico (CSI), todavia, as regiões Nordeste, Sul e Sudeste apresentam melhores valores de correlação. Quando analisado por região, o Centro-Oeste apresenta os melhores valores em todas as métricas, incluindo a correlação, considerando a escala temporal diária.

A subestimação das precipitações em zonas tropicais e a superestimação das precipitações em zonas áridas podem estar associadas, respectivamente, às baixas e altas

taxas de evapotranspiração. Isso ocorre principalmente nas parcelas que evaporam antes mesmo de atingir o solo, gerando, então, superestimativas e ocasionando "alarmes falsos" (MAGGIONI e MASSARI, 2018).

Caracciolo et al. (2018) observaram grande variação entre o produto de precipitação em escala diária estimado pelo GPM e a precipitação medida pela estação pluviométrica em solo, nas áreas próximas às zonas costeiras. O mesmo foi observado por Lima (2019), para a região litorânea de São Paulo, onde as estimativas do GPM não se mostraram satisfatórias.

Jiang e Bauer-Gottwein (2019) analisaram a capacidade de estimativa de precipitação dos produtos IMERG-F e IMERG-E em relação às estações pluviométricas em solo, tendo como área de estudo a China. Foram utilizadas 300 estações pluviométricas em solo. Os autores observaram uma ligeira dependência entre a capacidade de previsão do GPM e a topografia, de modo que as estimativas ficaram piores em áreas com relevo complexo.

Mohammed et al. (2020) avaliaram os produtos IMERG a partir de três abordagens: a) avaliar o impacto das características espaciais (zonas topográficas e hidrológicas); b) o desempenho em diferentes períodos; e c) avaliar o desempenho considerando diferentes intensidades de precipitação, utilizando dados horários, tendo como área de estudo a Arábia Saudita. Os resultados obtidos pelos autores supracitados para a avaliação sazonal ao longo das estações do ano se mostraram irregulares, de maneira geral, apresentando correlações baixas, embora tenha sido observado que o GPM tende a ser mais preciso no verão.

Quando analisado o desempenho considerando diferentes intensidades de precipitação, Mohammed et al. (2020) observaram uma detecção em todas as categorias de intensidade, sendo a precipitação do tipo tempestade a que apresentou melhor desempenho. Por fim, quando analisado em relevo mais movimentado, os valores de correlação foram baixos em todas as altitudes analisadas.

Li et al. (2021), ao avaliar a capacidade de predição do IMERG V6 utilizando dados horários acumulados para 24 horas, verificou que este produto captura bem as variabilidades espaciais e temporais da precipitação. Entretanto, apresenta uma capacidade limitada para detectar eventos de chuva leves, abaixo de 5 mm/dia, diferentemente das chuvas acima de 10 mm/dia, as quais apresentaram uma alta correlação.

Devido à dificuldade de obter dados em escala temporal horária de medições em solo, a maioria dos artigos opta por trabalhar com escalas temporais mensais e anuais. No Quadro 5 observamos que dos dezoito trabalhos compilados, somente quatro utilizaram a escala temporal horária para análise. Comumente os trabalhos utilizam escalas temporais iguais ou menos refinadas que a escala diária.

Quadro 5 – Resumo de alguns trabalhos com os produtos, períodos, escala temporal, quantidade de postos e região de estudo.

| Autor | Produto GPM utilizado | Período utilizado | Resolução Temporal (GPM) | Número de postos pluviométricos | Região |
|--|--|--------------------------|---|--|-----------------------|
| Gadêlha (2017) | GPM IMERG Level 3B | 12 meses | Mensal | 14 | Nordeste (Brasil) |
| Geng et. al. (2017) | GPM Level 3 IMERG Final | 11 meses | Mensal | | |
| Nicolete, Romagnoli1 & Zimback (2017) | 3IMERGM - (V4) | 12 meses | Mensal | 111 | Sudeste (Brasil) |
| Caracciolo et. al. (2018) | - | 24 meses | Horário e Diário | - | |
| Gadêlha (2018) | IMERG - Final Run (V4) | 12 meses | Diário/ Mensal e Anual | - | Brasil |
| Li et al. (2018) | IMERG Final Run | 12 meses | Horário | - | China |
| Lelis et. al., (2018) | IMERG V3 | 9 meses | Mensal | 372 | Sudeste (Brasil) |
| SANTOS et al (2018) | 3IMERGM - Final Run (V4) | 24 meses | Mensal/Anual | - | Norte (Brasil) |
| Satgé et. al., (2018) | IMERG V3/ IMERG V4/ IMERG V5 | - | Diária/Mensal | - | Paquistão |
| Andrade (2019) | GPM_3IMERGHH v05) e Early Run (GPM_3IMERGHHE V05 | 33 meses | Anual/Horário | 2 | Centro-Oeste (Brasil) |
| Bueno & Bourscheidt (2019) | - | 45 meses | Mensal | - | Sudeste (Brasil) |
| Fang et al., (2019) | GPM IMERG Day 1 Final Run V5 | 36 meses | Diário | 830 | China |
| Jiang & Bauer-Gottwein (2019) | IMERG-E e IMERG-F | 24 meses | Diária (utilizando dados de 30 minutos) | 838 | China |
| Lima (2019) | IMERG - Final Run | 12 meses | Mensal | - | Sudeste (Brasil) |
| Teodoro et al (2020) | IMERG - Early Run (V5) | 60 meses | Diário | 13 | Sudeste (Brasil) |
| Teng et. al., (2020) | Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM Final run V06B | 156 meses | Diário | 2.400 | China |

| Autor | Produto GPM utilizado | Período utilizado | Resolução Temporal (GPM) | Número de postos pluviométricos | Região |
|--------------------------------|--|--------------------------|----------------------------------|--|----------------|
| Mohammed et. al. (2020) | IMERG products; early, late, and final-run | 33 meses | Diário | 275 | Árabia Saudita |
| Li et. al. (2021) | GPM IMERG Day 1 Final Run V06 | 36 meses | Acumulado diário do dado horário | | China |

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nessa pesquisa, foram tratadas 6 bacias urbanas, inseridas no Distrito Federal, as quais serão, nomeadas e tratadas em função da Região Administrativa ou Setor Habitacional a qual a bacia urbana está inserida, totalizando 88,06 km² de áreas simuladas ao longo do Distrito Federal. Das 6 bacias urbanas estudadas (Figura 15), 4 bacias estão inseridas em área de estratégia de regularização urbana fundiária, listadas abaixo:

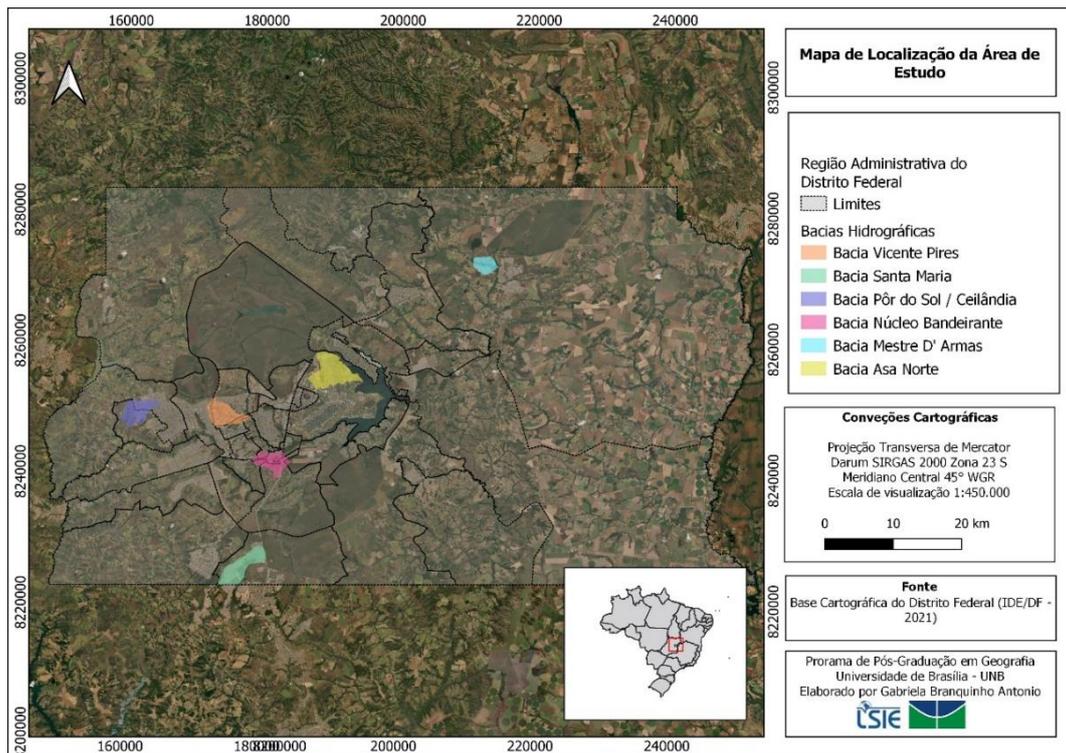


Figura 15 - Mapa de localização das áreas de estudo utilizadas em relação ao território do Distrito Federal.

As bacias urbanas foram definidas tendo como dado base o mapeamento de sub-bacias elaborado por Taveira (2015). A partir desse dado, as sub-bacias foram ajustadas utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução de 1 metro obtido a partir do Aerolevantamento realizado pela TerraCap em 2016. As sub-bacias hidrográficas serão tratadas pelo nome da Região Administrativa a qual está inserida.

- a) Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Mestre D’Armas I (15.S-1) – (R.A. de Planaltina) com área de 7,32 km²;

- b) Área de Regularização de Interesse Especial – ARINE Vicente Pires I (3.E-1) II (3.E-2) e Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Vicente Pires (3.S-1) (R.A. de Vicente Pires) com área de 12,27 km²;
- c) Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Vila Cauhy (S-4) (R.A. de Núcleo Bandeirante) com área de 12,04 km²;
- d) Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Sol Nascente (21.S-1) (R.A. Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia) com área de 14,24 km²;
- e) Santa Maria, Via Alagados com área de 18,19 km²; e
- f) Asa Norte, Plano Piloto com área de 24 km².

Breve caracterização

O Distrito Federal tem atualmente uma área de 5770 km² de extensão, de acordo com a última atualização do Macrozoneamento definido no Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT-DF, 2012). Sendo que, 20% do território do DF é definido como Zona Urbana, e quase 97% da população do DF vivem nas áreas urbanas (CODEPLAN, 2021).

O adensamento populacional, que superou a expectativa populacional prevista ou planejada para a cidade, levou à expansão e consolidação das ocupações em novas áreas, ocasionando a ocorrência de ocupações irregulares, que demandam do governo infraestrutura básica, serviços, qualidade ambiental e urbanística (CODEPLAN, 2021).

Embora as ocupações ocorram prioritariamente nas áreas definidas como urbanas, de acordo com o macrozoneamento do PDOT e com a Infraestrutura de Dados Espaciais do Distrito Federal (IDE/DF), 48% da área ocupada do DF ocorre na Zona Urbana. No entanto, quando consideradas as áreas demarcadas na estratégia de regularização urbana fundiária, que versa sobre a adequação dos Núcleos Urbanos Informais – NUI, observamos que 11% das ocupações da zona urbana estão inseridas em alguma modalidade de NUI, seja de Interesse Social (ARIS / REURB-S) ou de Interesse Específico (ARINE / REURB-E). Com exceção do Plano Piloto, todas as demais áreas intersectam alguma modalidade de área de regularização (Figura 16), de modo que Vicente Pires e Mestre D'Armas, por exemplo, estão integralmente inseridos em áreas de regularização.

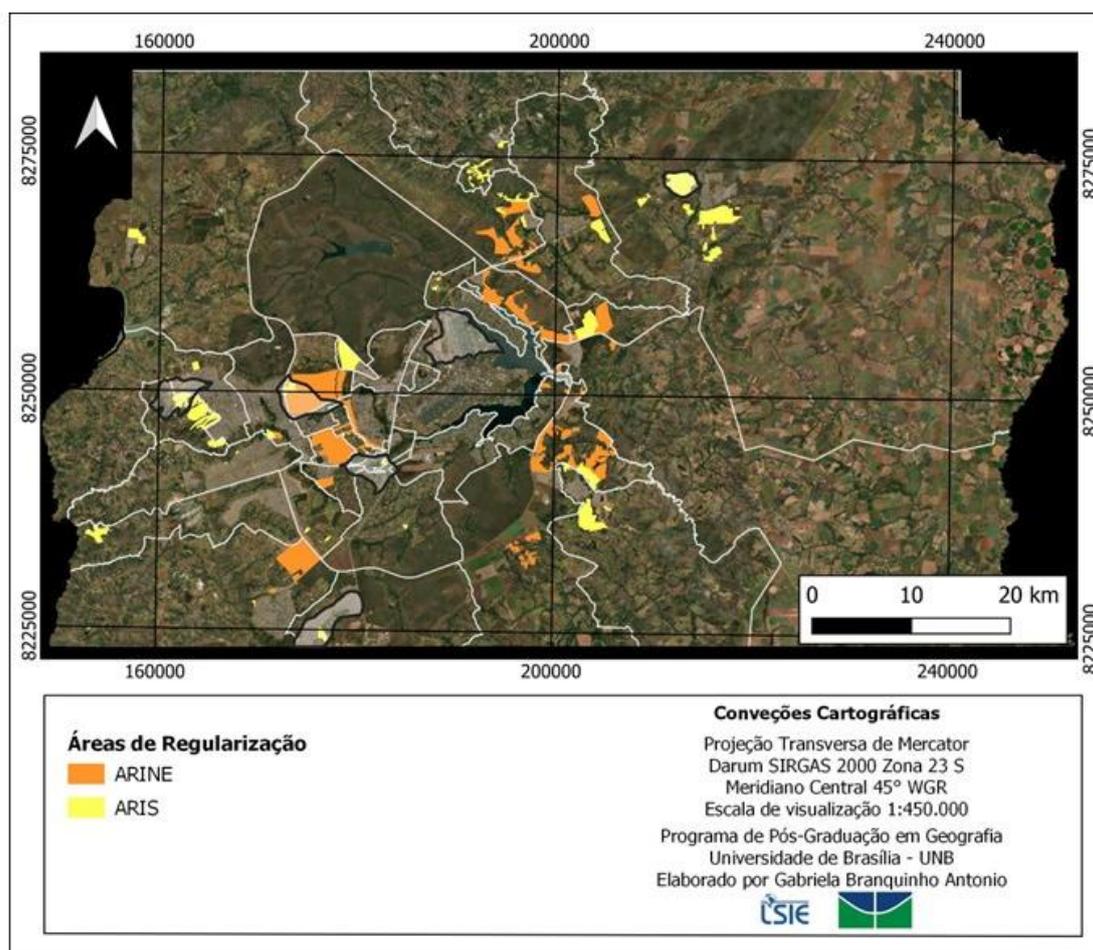


Figura 16 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação às áreas de Estratégias de Regularização Fundiária do PDOT no Distrito Federal.

Fonte: IDE-DF (Geoportal, 2023).

De maneira geral, à ARIS e ARINE diferenciam-se entre si em função da faixa de renda dos moradores e similaridade das características urbanas e ambientais (DISTRITO FEDERAL, 2009). Os Núcleos Urbanos Informais, mesmo a ARINE, que usualmente tem o perfil de alta renda, promovem uma ocupação não planejada, que usualmente possui pavimentação, mas não tem implantada sistema de esgotamento sanitário e drenagem urbana. Por vezes, o arcabouço legal de normas e leis urbanísticas e ambientais tendem não ser seguidos, por serem ocupações irregulares.

As áreas ocupadas inseridas nas estratégias de regularização urbana fundiária, precisam passar por todo o processo de regularização para que haja a possibilidade do Estado levar infraestrutura básica para essas regiões. Até o presente momento, foram emitidas 86 Diretrizes Urbanísticas Específicas – DIUPE e 30 Estudos Territoriais

Urbanos – ETU em áreas passíveis de regularização, sendo esses instrumentos, o início do processo de regularização.

O processo de regularização deve considerar o disposto no Art. 131 da Lei Complementar n° 803, de 25 de abril de 2009, a qual deve ser considerado a situação fática da área. Embora a situação fática tenha como finalidade facilitar o processo de regularização e proporcionar o mínimo de qualidade de vida para a população, paralelamente, permite regularizar ocupações extremamente precárias.

Além disso, o ‘processo inverso’ de consolidação urbana, pavimentação do sistema viário sem que haja a implantação do sistema de drenagem urbana de águas pluviais e do sistema de esgotamento sanitário, gera um grande ônus para o Estado.

A responsabilidade de implementação da infraestrutura básica nos termos da Lei Federal n° 6.766, de 19 de dezembro de 1979, compete ao empreendedor quanto a implantação no interior da área a ser parcelada e ao estado, de realizar a ligação da infraestrutura pública até o novo parcelamento.

No que tange o sistema de drenagem urbana de águas pluviais, poucas são as áreas as quais a drenagem urbana está completamente instalada. Isto ocorre inclusive no Plano Piloto, em que consta como parcialmente instalado, de acordo com o Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal (PSDB – DF, 2017) e com o Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, referente ao ano de 2021 (Figura 17).

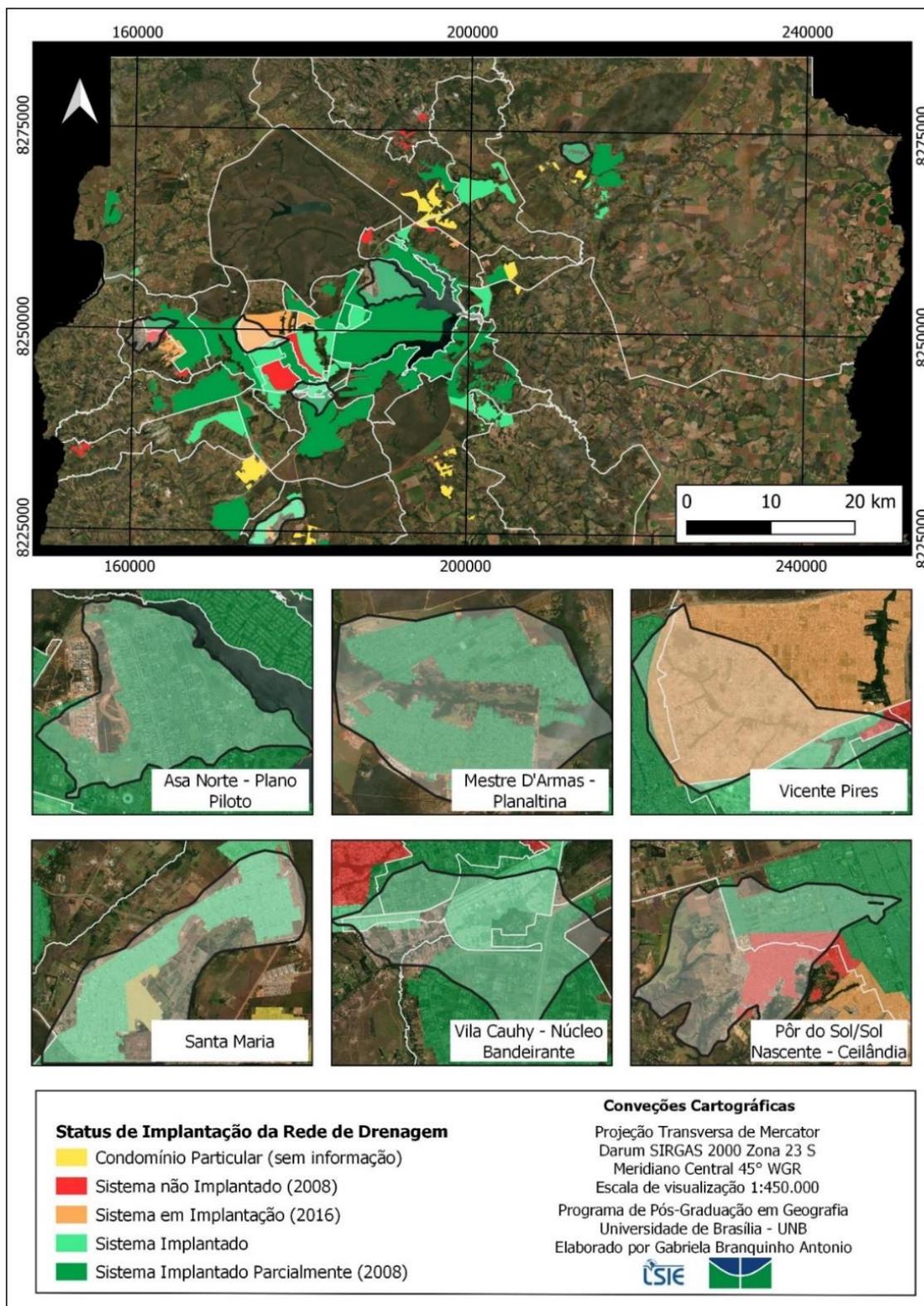


Figura 17 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação ao mapeamento de situação de implantação da rede de drenagem de águas pluviais no Distrito Federal.

Fonte: Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal

Associada a questão da falta drenagem urbana em diversos pontos do Distrito Federal, há também como desdobramento das ocupações irregulares, o baixo percentual

de áreas permeáveis nessas áreas que foram ocupadas de forma não planejada, as quais não seguem as normas e diretrizes dos instrumentos legais que existem, tais como os Plano de Manejo das Áreas de Proteção Ambiental e Lei Complementar nº 948, de 16 de junho de 2019 que aprova a Lei de Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal – LUOS.

De modo que às áreas permeáveis, usualmente são Áreas de Proteção Permanente (APP) relativo a curso de água ou nascente, como o que ocorre principalmente em Vicente Pires (Figura 18).

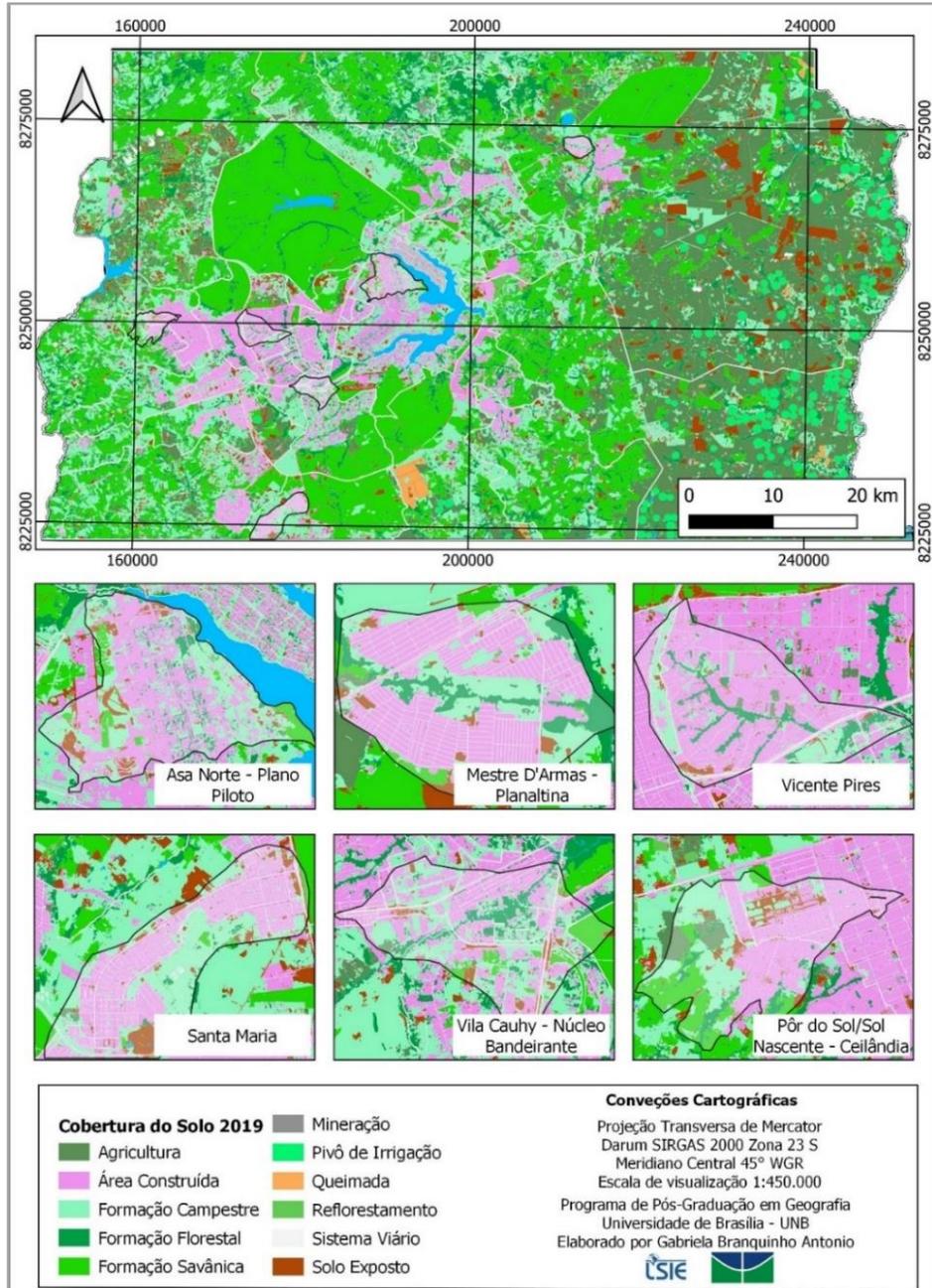


Figura 18 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação ao uso e cobertura do solo do Distrito Federal.

Fonte: Uso e Cobertura do Solo de 2019 (IDE – DF, 2023).

Breve caracterização Física/Ambiental

No Distrito Federal ocorrem de maneira geral declividades baixas, caracterizando o relevo como plano ou suave ondulado (Figura 19). Algumas áreas apresentam um relevo mais movimentado com declividades mais acentuadas (maiores que 20%), como o que ocorre na Bacia Hidrográfica do Rio Maranhão (ao norte do DF), na Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu e na porção sudoeste da Bacia Hidrográfica do Descoberto.

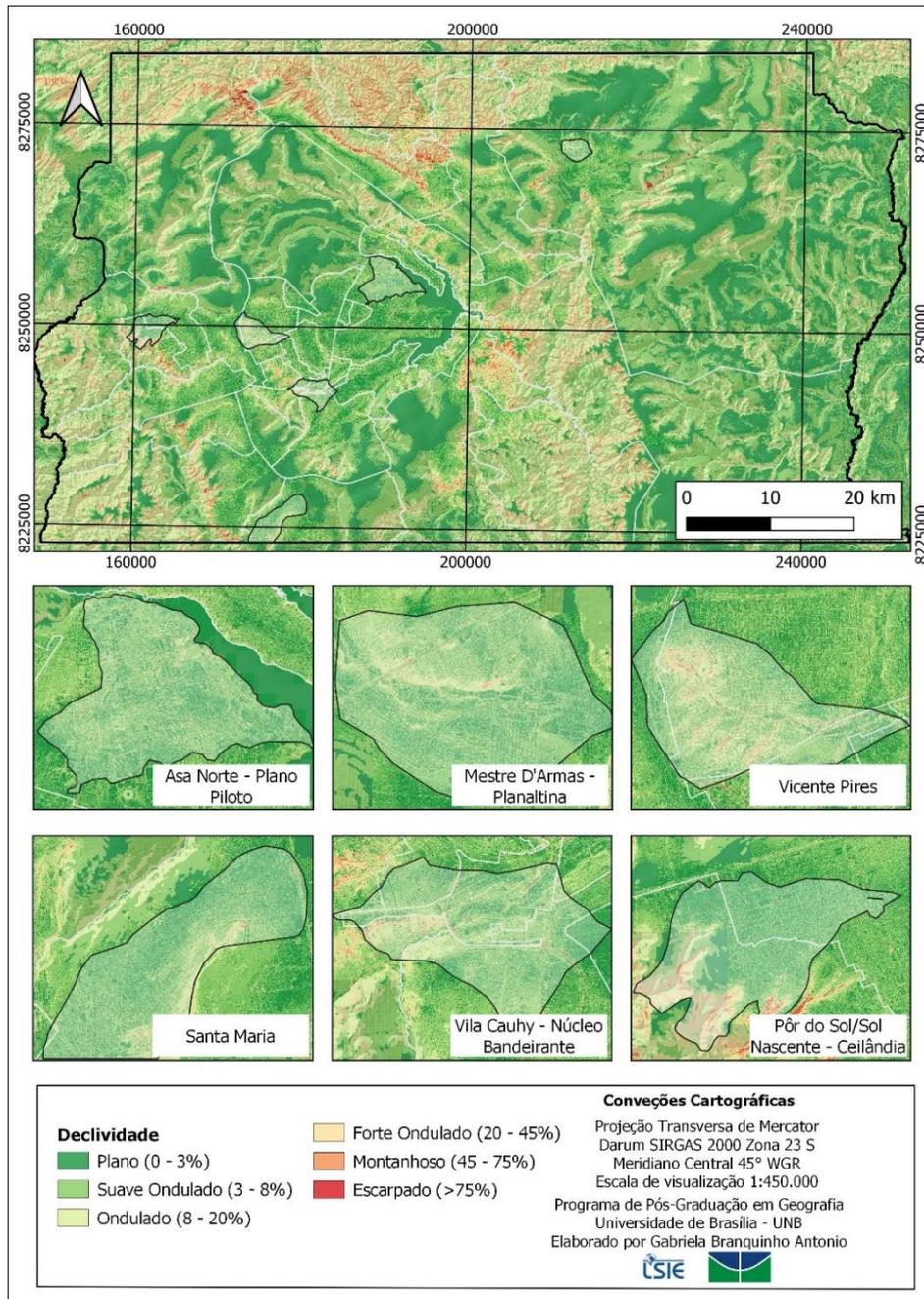


Figura 19 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação à declividade do Distrito Federal.

Fonte: Modelo Digital de Elevação (IDE – DF, 2023).

Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** é apresentado um resumo da altimetria e da declividade das sub-bacias, tais com a amplitude altimétrica e a declividade média.

Tabela 1 - Parâmetros morfométricos

| Parâmetro Morfométrico | Asa Norte | Mestre D' Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | | Vicente Pires |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|---------|---------|---------------|
| | | | | | | | | |
| Amplitude altimétrica | 172.65 | 74.29 | 143.91 | 155.42 | 255.06 | 255.40 | 233.89 | 183.38 |
| Altitude máxima | 1172.87 | 1004.40 | 1154.95 | 1249.75 | 1276.69 | 1255.00 | 1276.87 | 1246.23 |
| Altitude Mínima | 1000.22 | 930.11 | 1011.04 | 1094.33 | 1021.63 | 999.60 | 1042.98 | 1062.85 |
| Declividade Média | 6.03 | 6.46 | 7.79 | 6.15 | 5.79 | 9.60 | 10.18 | 10.05 |
| Variância da Declividade | 65.99 | 40.84 | 99.73 | 51.87 | 68.58 | 131.76 | 288.64 | 152.44 |

Nas áreas estudadas, a sub-bacia hidrográfica inserida na Região Administrativa de Vicente Pires, apresenta altas declividades associadas Córrego Vicente Pires na e na bacia inserida na Região Administrativa do Pôr do Sol, as altas declividades ocorrem a montante da bacia associados aos Córregos das Corujas e da Embira Branca (Figura 20 e Figura 21). Nas demais sub-bacias hidrográficas, não ocorrem declividades elevadas.

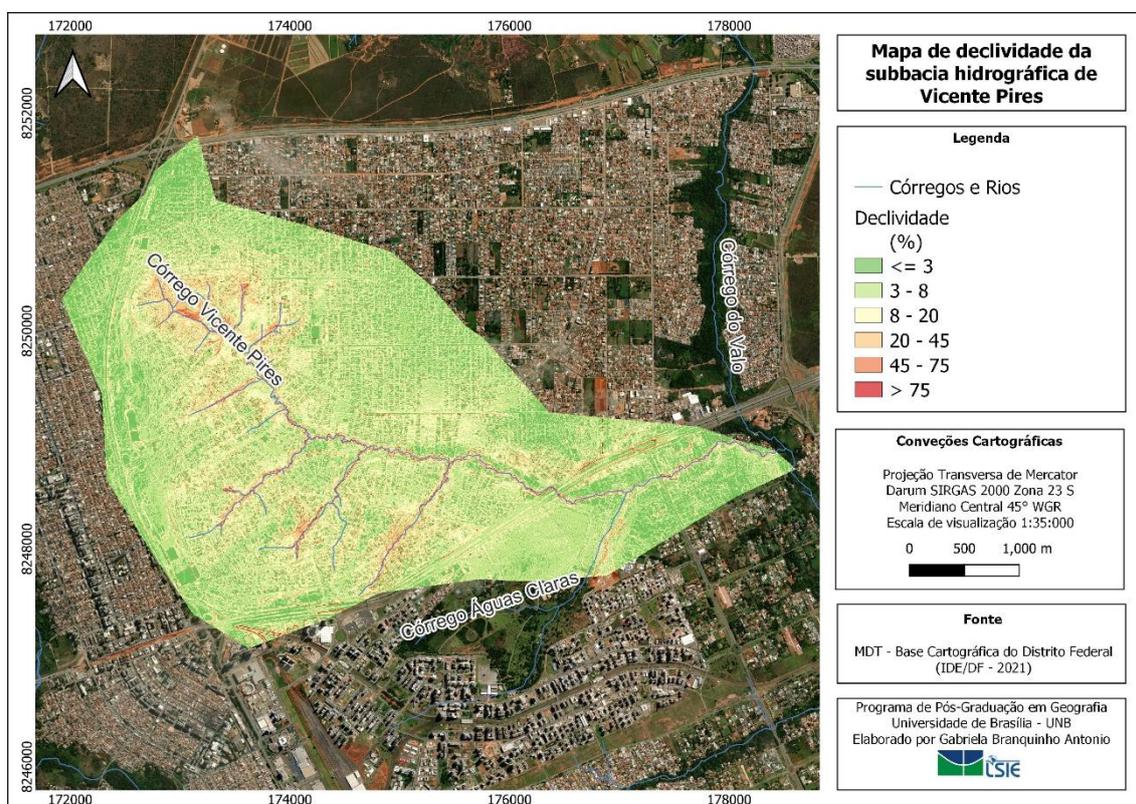


Figura 20 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires, Distrito Federal.

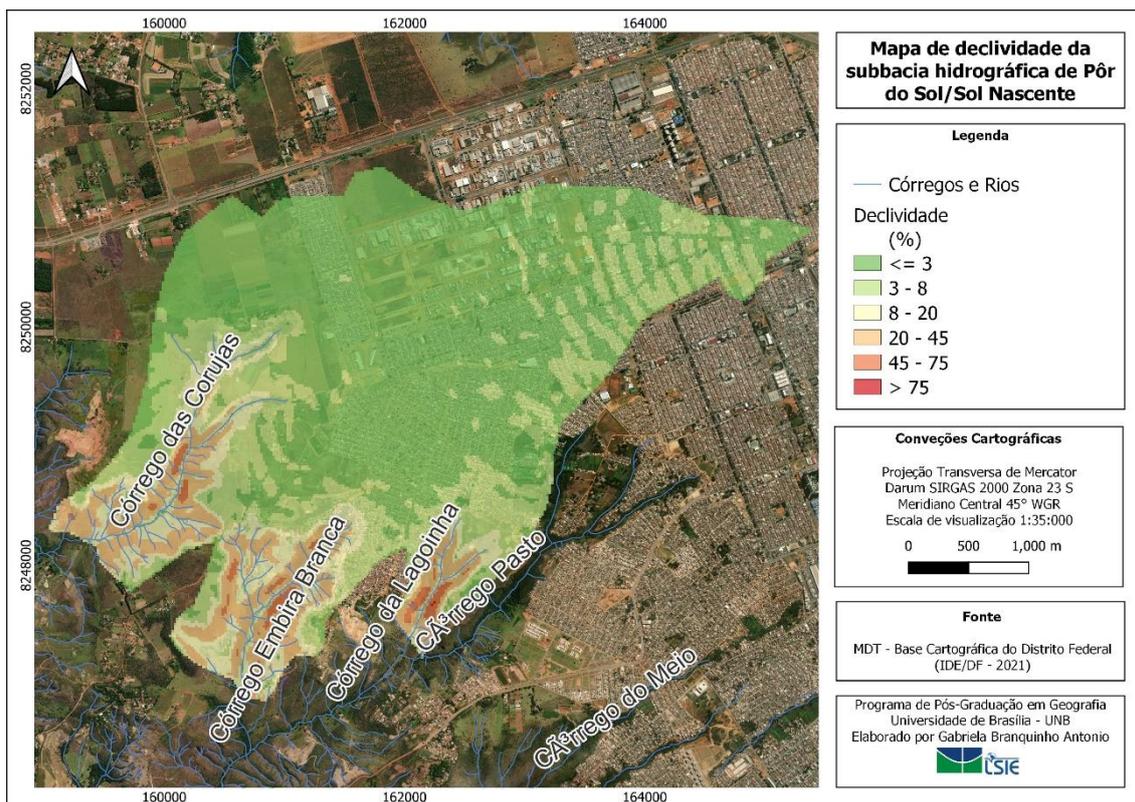


Figura 21 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires, Distrito Federal.

De maneira geral, ocorrem nas bacias estudadas as seguintes tipologias de solos, Cambissolos, Latossolos (vermelho e vermelho-amarelo), Gleissolos e Espossolos (Figura 22). Nas áreas com declividades mais acentuadas ocorrem os Cambissolos, que de maneira geral são caracterizados por serem solos poucos profundos e mal drenados, ou seja, mesmo quando não impermeabilizado, apresentam um potencial de infiltração reduzido, favorecendo o escoamento superficial.

As áreas com relevo mais suave, favorecem a ocorrência de solos mais bem desenvolvidos, como é o caso dos Latossolos que ocorrem em quase todas as bacias estudadas. Embora os Latossolos possam diferenciar-se entre si, por diferentes características, de maneira geral, são caracterizados por serem solos profundos, bem desenvolvidos e bem drenados quando não impermeabilizados, favorecendo a ocorrência do processo de infiltração em detrimento do escoamento superficial.

Nas bacias de Vicente Pires, Santa Maria e Mestre D' Armas, ocorrem Gleissolos que são solos hidromórficos, ocorrendo em superfícies aplainadas e em geral rebaixadas, sendo locais favoráveis à saturação em água, são mal drenados, podendo permanecer úmidos durante o período de chuva devido à altura do lençol freático.

Na bacia de Santa Maria ocorre de forma discreta o Espodossolos, embora apresentem solos geralmente profundos, são mal drenados, isso porque ocorrem em locais com lençol freático mais elevado, deixando-o frequentemente mais úmido.

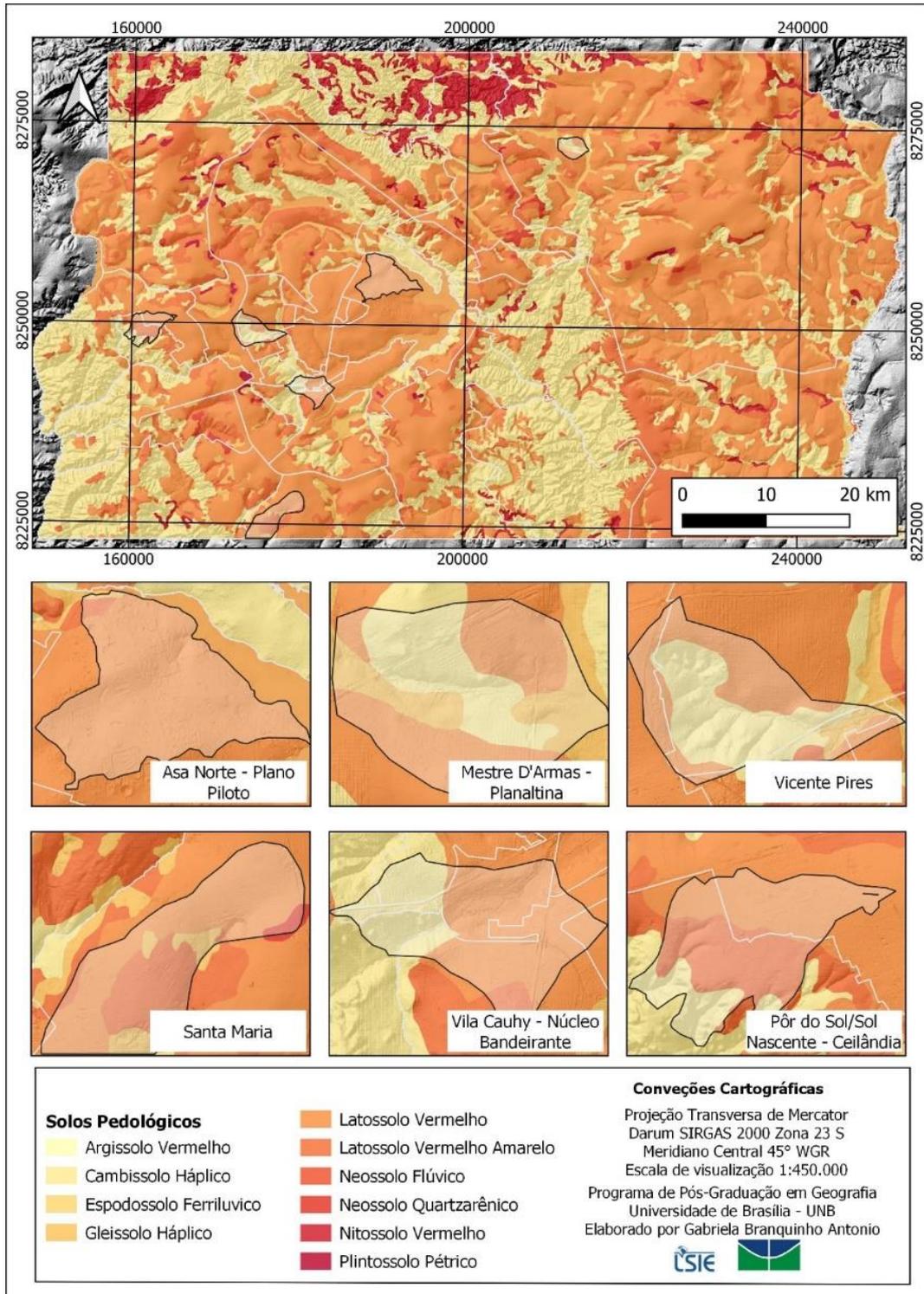


Figura 22 - Mapa de localização das áreas de estudo em relação aos solos pedológicos do Distrito Federal.

Fonte: Solos Pedológicos (SISDIA, 2023).

De acordo com a Compartimentação Geomorfológica disponibilizada pelo Sistema Distrital de Informações Ambientais – SISDIA, as áreas de estudo estão inseridas nas seguintes unidades geomorfológicas Planaltos, Planaltos Intermediárias, Escarpas, Planície e Rebordos (Figura 23).

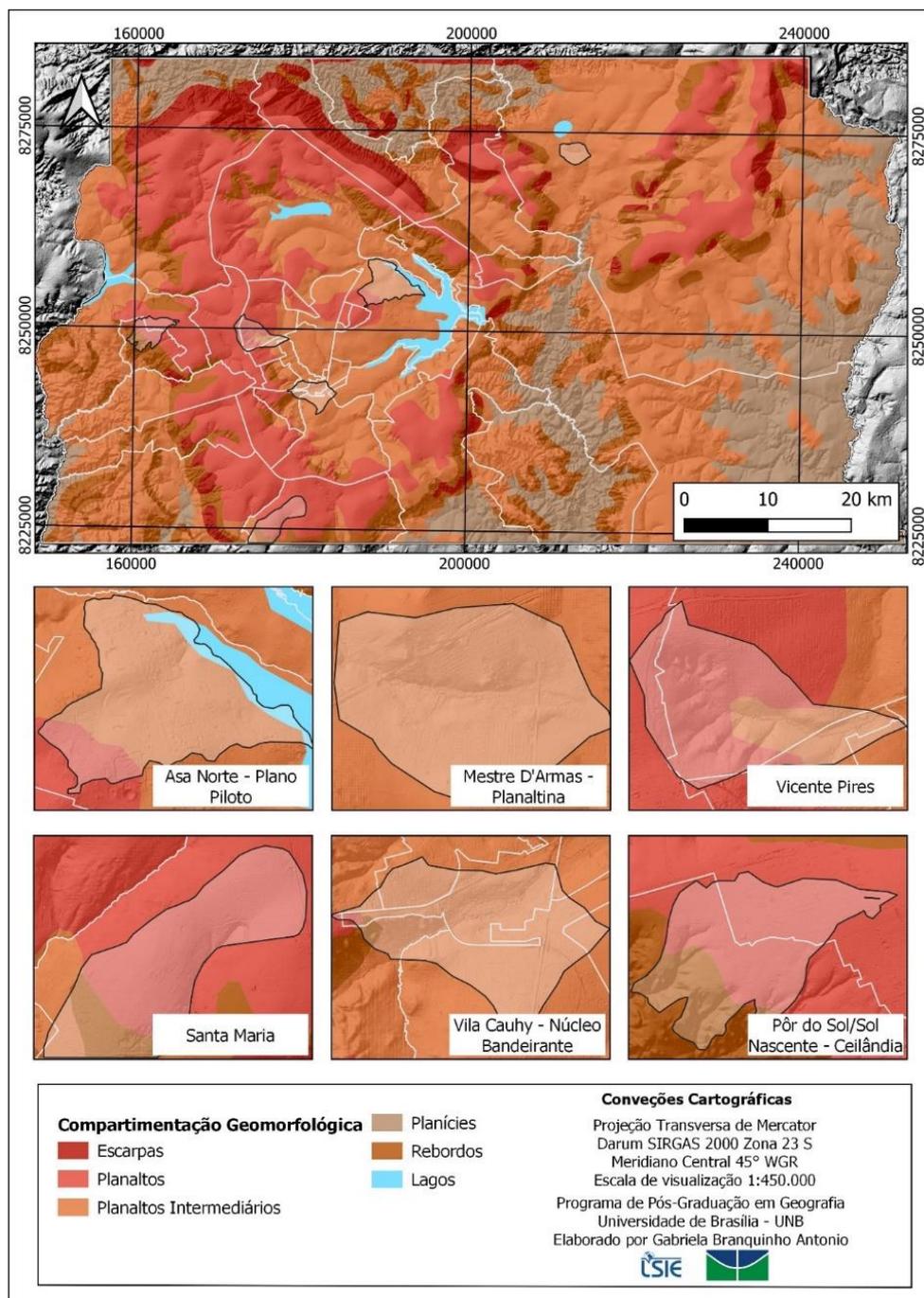


Figura 23 Mapa de localização das áreas de estudo à compartimentação geomorfológica do Distrito Federal.

Fonte: Compartimentação Geomorfológica (SISDIA, 2023).

Os Planaltos e as Planícies caracterizam-se por ocorrerem em terrenos com declividades mais planas. Se diferenciam em função da altitude que usualmente ocorrem, de modo que, os Planaltos ocorrem em regiões de altitude mais elevada, como as chapadas e, as Planícies ocorrem em altitude mais baixas, podendo ter origem fluvial ou aluvial.

As Escarpas e os Rebordos estão associados a áreas com declividades mais elevadas e terrenos mais movimentados. As Escarpas, usualmente ocorrem nas bordas dos planaltos e os Rebordos ocorrem entre planas de alta e baixa altitude.

A forma do terreno, assim como a declividade influencia na propagação do escoamento superficial, de modo que, as áreas planas e principalmente as concavas possuem características de zonas de recepção do escoamento superficial e, as áreas convexas tendem a dispersar o escoamento superficial.

Breve caracterização hidrológica

O Distrito Federal - DF é caracterizado por essencialmente por dois períodos, o de seca com umidade baixa, que compreendem os meses de maio a setembro, e o de chuva, tendo início em outubro e terminando em abril.

De acordo com a estação pluviométrica A001, localizada na sede do INMET (estação pluviométrica automática mais próxima da Asa Norte), o primeiro e último trimestre do ano, são os períodos mais chuvoso, com destaque para os meses de março e novembro. De modo que, o mês de abril e de setembro se assemelham a períodos de transição entre o período de chuva para o de seca (Figura 24).

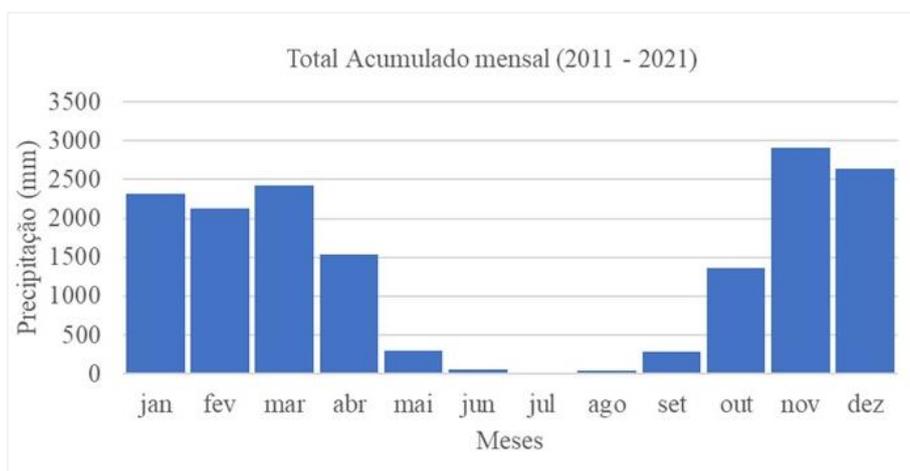


Figura 24 – Frequência dos meses com maior acumulado mensal por mês considerando uma série de 5 anos (2014 a 2019). Estação Pluviométrica de Referência A001 INMET localizada no Sudoeste – DF.

Análise morfométrica das sub-bacias

A caracterização morfométrica nos permite avaliar o potencial hídrico de uma região, tornando-se, portanto, um instrumento fundamental para a caracterização das bacias hidrográficas (MARTINS et. al., 2021). Além disso, traz indicativos do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

Nesse sentido foi calculado os seguintes parâmetros morfométricos: Área total, Perímetro (km), Coeficiente de compacidade, Comprimento do rio principal, Comprimento total dos rios, Densidade de drenagem, Fator forma, Índice de circularidade (IC), Índice de Conformação (Fc), Declividade Mínima, Declividade Média, Declividade Máxima, Amplitude da bacia e Índice de sinuosidade. Para isso, foi inicial calculados os parâmetros indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos Parâmetros morfométricos das sub-bacias hidrográficas estudadas.

| Parâmetro Morfométrico | Área de estudo | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|-------|-------|---------------|
| | Asa Norte | Mestre D' Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | | Vicente Pires |
| Área total | 24.00 | 7.32 | 12.04 | 18.19 | 2.84 | 7.50 | 3.90 | 12.27 |
| Perímetro (km) | 25.76 | 10.43 | 16.45 | 20.70 | 11.24 | 16.72 | 13.28 | 17.81 |
| Coeficiente de compacidade (kc) | 1.48 | 1.09 | 1.34 | 1.37 | 1.88 | 1.72 | 1.90 | 1.43 |
| Comprimento do rio principal | 1.64 | 4.57 | 4.54 | 4.35 | 2.72 | 1.88 | 1.11 | 7.80 |
| Comprimento total dos rios | 1.64 | 4.57 | 4.54 | 7.03 | 11.94 | 9.47 | 2.56 | 19.48 |

Coeficiente de compacidade (kc)

De acordo com o Coeficiente de Compacidade (kc) (Tabela 3), a sub-bacia hidrográfica de Mestre D' Armas tende a ter uma forma mais arredondada, o que favorece uma redução no tempo de concentração propiciando a ocorrências de inundação, isso porque o escoamento tende a convergir para a saída quase que ao mesmo tempo.

Tabela 3 - Parâmetro morfométrico, Coeficiente de Compacidade

| Parâmetro Morfométrico | Asa Norte | Mestre D' Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | | Vicente Pires |
|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|------|-----|---------------|
| Coeficiente de Compacidade (kc) | 1,48 | 1,09 | 1,34 | 1,37 | 1,88 | 1,72 | 1,9 | 1,43 |

Já as sub-bacias hidrográficas da Asa Norte, Núcleo Bandeirante, Santa Maria e Vicente Pires, apresentam um Kc entre 1,25 a 1,50, indicando uma forma elíptica sendo o escoamento superficial nessa sub-bacias mais bem distribuído no tempo.

As sub-bacias do Pôr do Sol/Sol Nascente apresentam um Kc superior a 1,50 indicando uma forma radial ou ramificada que convergem em uma saída.

Fator de forma (Ff)

O Fator Forma indica se a bacia hidrográfica é mais alongada ou arredondada. Quanto menor o Ff, mais comprida é a bacia e, portanto, menos sujeita a picos de inundação, pois o Tempo de concentração é maior.

Tabela 4 - Parâmetro morfométrico, Fator Forma

| Parâmetro Morfométrico | Asa Norte | Mestre D' Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | | Vicente Pires |
|------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|------|------|---------------|
| Fator Forma | 8,95 | 0,35 | 0,58 | 0,37 | 0,02 | 0,08 | 0,59 | 0,03 |

Com exceção da sub-bacia hidrográfica da Asa Norte que apresenta uma tendência a ser mais arredondada (ou circular), as demais bacias têm uma forma mais alongada.

Densidade de drenagem (Dd)

A densidade de drenagem expressa a relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica e a sua área total. Na Tabela 5 são apresentados os valores de Densidade de Drenagem por sub-bacia hidrográfica estudada.

Tabela 5 – Parâmetro Morfométrico, densidade de drenagem

| Parâmetro Morfométrico | Asa Norte | Mestre D' Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | | Vicente Pires |
|--|-----------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|------|------|---------------|
| Densidade de drenagem | 0.07 | 0.62 | 0.38 | 0.39 | 4.2 | 1.26 | 0.66 | 1.59 |
| Bacias com drenagem pobre → $Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$ | | | | | | | | |
| Bacias com drenagem regular → $0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$ | | | | | | | | |
| Bacias com drenagem boa → $1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$ | | | | | | | | |
| Bacias excepcionalmente bem drenadas → $Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$ | | | | | | | | |

A densidade de drenagem trás indicativos da taxa de infiltração das bacias hidrográficas, de modo que, baixas densidades de drenagem podem sugerir alta taxa de infiltração devido as condições de não saturação do solo. Enquanto uma alta densidade de drenagem, pode indicar uma taxa baixa de infiltração.

Índice de Circularidade

De acordo com Calixto (2015), os valores do Índice de Circularidade nunca são maiores que um, de modo que, quanto menor esse valor mais alongado será a bacia hidrográfica. Nesse sentido, a sub-bacia de Mestre D'Armas apresenta um valor de IC de 0,85 apresentando uma tendência a ser mais arredondada, enquanto as demais bacias apresentam valores mais distantes de um, indicando uma forma mais alongada (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetro Morfométrico, Índice de Circularidade

| Parâmetro Morfométrico | Asa Norte | Mestre D'Armas | Núcleo Bandeirante | Santa Maria | Pôr do Sol/Sol Nascente | | Vicente Pires |
|------------------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------|-------------------------|------|---------------|
| Índice de Circularidade (IC) | 0.45 | 0.85 | 0.56 | 0.53 | 0.28 | 0.34 | 0.28 |

3.2.COMPILAÇÃO DAS NOTIFICAÇÕES DE ALAGAMENTO

3.2.1. COMPILAÇÃO DOS DADOS CIDADÃOS

A compilação dos dados de notificações de alagamento seguiu de maneira geral a lógica indicada no fluxograma apresentado na Figura 25, sendo esse detalhado adiante.

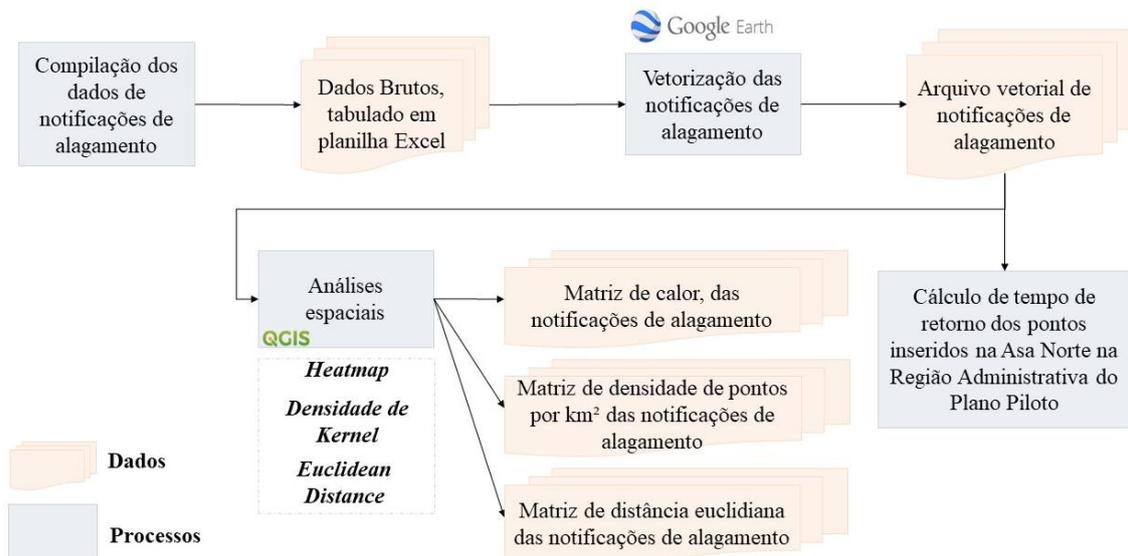


Figura 25 - Fluxograma da compilação dos dados cidadãos.

A compilação das informações sobre os alagamentos no Distrito Federal, foi realizada consultando portais de notícia, utilizando o termo “Alagamentos e enchentes no Distrito Federal”.

Visando realizar a compilação dos dados de forma padronizada, foram definidos um conjunto de informações que deveriam ser preenchidas para que o dado pusesse ser ‘válido’, sendo esses campos:

- a) A data que ocorreu o alagamento;
- b) A Região Administrativa que se deu o alagamento;
- c) Endereço da ocorrência do alagamento; e,
- d) Fonte, o site de notícias consultado.

Outros campos foram acrescentados, de modo a complementar as informações caso fosse citado na notícia, sendo eles:

- a) Local Alagado (uso e cobertura),
- b) Dano (se ocorreu algum dano, incluindo possíveis fatalidades);
- c) Duração do Evento (em horas e/ou minutos);
- d) Hora de Início do Evento (em 24 horas);
- e) Hora Final do Evento (em 24 horas); e,
- f) Altura da Lâmina de Água (que se registrou o alagamento).

Todos os pontos de alagamento cadastrado receberam um código identificador único, relativo à coluna: ID (identificador único da informação coletada no site, que varia de 0 a infinito).

O período cadastrado foi de 01 de abril de 2013 a 31 de dezembro de 2020, visto que o objetivo era a atualização do cadastro já realizado por Batista (de janeiro de 1999 a março de 2013).

3.2.2. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS CIDADÃOS

A espacialização dos dados cidadãos foi realizada por intermédio do programa Google Earth, a partir do endereço no portal de notícias. Posteriormente, estas informações foram exportadas e trabalhadas em um Sistema de Informação Geográfica (QuantumGis).

3.2.3. ANÁLISES ESPACIAIS DOS DADOS CIDADÃOS

Foram elaborados produtos cartográficos, tais como, mapas de calor, de distância euclidiana e de densidade de pontos por área consolidada por Região Administrativa:

O mapa de calor (*Heatmap*) cria um raster de densidade, que é calculada a partir de pontos vetoriais, usando a estimativa de densidade do kernel (SILVERMAN, 1986). A densidade é calculada com base no número de pontos em um local, de modo que, quanto maior o agrupamento de pontos, maior será a densidade, sendo possível identificar hotspots e agrupamento de pontos.

A densidade de pontos por área consolidada por Região Administrativa, foi realizada considerando a área consolidada de cada Região Administrativa e a quantidade de pontos de notificações de alagamento inseridos nessa área consolidada. As classes de Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto foram classificadas utilizando os quartis.

A distância euclidiana fornece a distância de cada célula no raster que contém a distância medida de cada célula até a fonte mais próxima (GAUCH, 1982). As distâncias são medidas em linha reta (distância euclidiana) nas unidades de projeção do raster, como pés ou metros, e são computadas do centro da célula.

Antes de realizar a análise de Distância Euclidiana, foi realizado uma sobreposição entre as bocas de lobo e a poligonal da mancha urbana consolidada, sendo possível verificar que tanto as bocas de lobo como as notificações de alagamento ocorrem predominantemente na área urbana consolidada, de modo que, quanto mais próximo da borda dessa mancha, menor a quantidade de equipamentos públicos, bocas de lobo e notificações de alagamento.

Considerando que 61% das notificações de alagamento estavam nos primeiros 100 metros de distância em relação as bocas de lobo, optou-se por adotar intervalos de 50 metros até os 100 metros iniciais (0 a 50 e 50 a 100). A distância de 50 metros foi definida considerando o espaçamento máximo entre as bocas de lobo recomendado no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU, 2009).

De modo que 39% das notificações de alagamento ocorrem em distância maiores que 100, conclui-se que não haveria necessidade de adotar o intervalo de 50 metros para toda a análise, dessa forma, as demais faixas de distâncias adotadas foram: 100-250, 250-500, 500-1000, 1000-2000 e >2000.

Considerando a população que se desloca dentro da cidade, seja a pé de um ponto a outro ou a população que se desloca a partir de algum modal de transporte público, o índice de caminhabilidade define que a faixa de 500 a 1000 m é uma distância aceitável para que o pedestre se desloque em condições normais (ITDP, 2018) para acessar os mais diversos serviços da cidade.

Contudo, diante da ocorrência de alagamentos, o acesso da população aos diversos serviços da cidade, é prejudicado, principalmente quando é necessário caminhar distâncias muito maiores do que 1000 m, seja esse deslocamento totalmente a pé (do ponto de partida ao ponto de chegada) ou um deslocamento que o pedestre faça de algum modal de transporte público ao serviço alvo. Dessa forma, optou-se por analisar a quantidade de equipamentos públicos que estão inseridos nas áreas próximas aos alagamentos, utilizando faixas de distância de 500 m.

Em tempo, foi utilizado a estação pluviométrica A001 do INMET para verificar a relação entre a quantidade de notificações de alagamento e a precipitação média anual.

3.3. ANÁLISE MORFOMÉTRICA DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

A análise morfométrica de bacias hidrográficas é uma técnica utilizada para estudar as características geométricas e topográficas das bacias hidrográficas. Essa análise envolve a medição e análise de parâmetros morfométricos, como área, perímetro, forma, comprimento do curso d'água principal, densidade de drenagem, inclinação, entre outros. Esses parâmetros fornecem informações importantes sobre a forma e a estrutura da bacia hidrográfica, permitindo a compreensão de sua resposta hidrológica.

As análises foram realizadas utilizando técnicas e ferramentas geoespaciais, como sistemas de informações geográficas (SIG) QuantumGis. Foram calculados os parâmetros morfométricos descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Descrição dos parâmetros morfométricos

| Características | Parâmetro Morfométrico | Descrição |
|-----------------|----------------------------------|--|
| Geométricas | Área total (A) | Refere-se à extensão total da superfície da bacia hidrográfica, medida em unidades de área (por exemplo, quilômetros quadrados). |
| | Perímetro da Bacia (P) | o comprimento total da linha que delimita a bacia hidrográfica. |
| | Coefficiente de compacidade (kc) | Calculado como a razão entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área. Esse coeficiente fornece uma medida de quão próxima a forma da bacia é de |

| | | |
|-------------------------|--|---|
| | | um círculo perfeito, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de uma forma mais compacta. |
| | Fator forma (Kf) | Obtido pela divisão do perímetro da bacia ao quadrado pela área total. Esse fator é uma medida da complexidade da forma da bacia, sendo valores mais altos indicativos de bacias com formas mais irregulares. |
| | Índice de circularidade (Ic) | Calculado como a razão entre a área da bacia e o quadrado da distância máxima entre os pontos da bacia. Esse índice varia entre 0 e 1, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de uma bacia mais circular. |
| Relevo | Amplitude altimétrica | refere-se à variação de altitude ou elevação em uma determinada área geográfica, geralmente expressa em metros ou outra unidade de medida vertical. |
| Rede de drenagem | Comprimento do rio principal km | Refere-se à extensão do curso d'água principal dentro da bacia hidrográfica. É medido ao longo do curso do rio, desde a nascente até a foz. |
| | Comprimento total dos rios km | É a soma dos comprimentos de todos os cursos d'água presentes na bacia hidrográfica, incluindo o rio principal e seus afluentes. |
| | Densidade de drenagem km ² /km (Dd) | É uma medida da quantidade de canais de drenagem em uma determinada área. É calculada dividindo-se o comprimento total dos rios pela área da bacia hidrográfica. A densidade de drenagem indica o grau de ramificação e interconexão da rede de drenagem. |

3.4. DADOS DE PRECIPITAÇÃO

3.2.1. Estações pluviométricas

Inicialmente, foi feita uma verificação visando identificar a disponibilidade e continuidade dos dados das séries pluviométricas automáticas de medição em solo. Dessa forma, foi possível definir o intervalo de tempo a ser utilizado.

Foi estabelecido então, um período de 5 anos, que compreende o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2019, com um total de 11 estações pluviométricas automáticas de medição em solo (Quadro 6), sendo 3 do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e 9 da Agência Nacional de Águas - ANA, as quais são disponibilizadas e podem ser consultadas no Hidro-Telemetria do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Quadro 6 – Relação da estação pluviométrica e o Grid de referência, para o período disponível.

| GRID | Gestão da estação | ESTAÇÃO | PERÍODO |
|------|-------------------|---------|-----------|
| 33 | INMET | A045 | 2009-2019 |
| 45 | ANA | 1547091 | 2014-2019 |
| 48 | ANA | 1547040 | 2014-2019 |
| 51 | ANA | 1548054 | 2014-2019 |
| 54 | INMET | A001 | 2009-2019 |
| 66 | ANA | 1547079 | 2011-2019 |
| 68 | ANA | 1547082 | 2014-2019 |
| 76 | INMET | A046 | 2014-2019 |
| 95 | ANA | 1647009 | 2014-2019 |

As estações pluviométricas do INMET realizam as medições a cada 1 hora e as estações pluviométricas da ANA a cada 15 minutos e o GPM afere as precipitações a cada 30 minutos. Dessa forma, foi necessário realizar uma compatibilização nos tempos dos dados de precipitação, de modo que todos ficassem na mesma base de tempo.

A compatibilização consistiu em acumular os dados de precipitação para uma única base tempo, de modo que os dados foram acumulados para 1 hora. Considerando o volume de dados, o acumulado e a união das tabelas, estação pluviométrica e GPM, foi realizado através de um código SQL.

Posteriormente, para fins de detalhamento foi analisado um período maior (2005 a 2020), concentrado as análises na estação pluviométrica A001no, Plano Piloto.

3.2.2. *Global Precipitation Measurement – GPM*

De modo a tentar superar o desafio referente a heterogeneidade das precipitações no DF e a insuficiência do monitoramento pluviométrico com estações automáticas, foram utilizados dados de precipitação do sistema satelital GPM.

Foram utilizados os dados do GPM IMERG Execução Final versão 06 com resolução temporal de 30 minutos e espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (~10kmX10km). Os dados foram baixados no endereço https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary, foi utilizada a variável de precipitação precipitationCal, a qual é a precipitação já calibrada.

Os dados originalmente têm o formato .nc4, sendo necessário realizar uma transformação para o formato GeoTiff. Esta transformação foi realizada a partir da elaboração de um código em Python que executa a ferramenta MakeNetCDFRasterLayer (Erro! Fonte de referência não encontrada.) do ArcMap 10.6, criando um *raster* temporário e o exportando para o formato Geotiff.

Posteriormente, as imagens foram pré-processadas no ENVI 5.3 Classic, visando criar um arquivo multibanda, a partir do empilhamento das imagens do GPM. Dessa forma, gerou-se um único arquivo com todos os tempos, possibilitando então extrair os dados numéricos da imagem para cada grid determinado.

Para realizar as análises mais detalhadas, para o período de 2005 a 2020, foi utilizado o *Google Earth Engine*, o qual, possibilita que os dados sejam exportados em formato .csv. Todos os dados do GPM utilizados, após tabulados no Excel, receberam o ajuste relativo ao UTC de referência.

3.2.3. *Métricas estatísticas*

Algumas métricas estatísticas são largamente utilizadas para avaliar o desempenho do GPM em estimar as precipitações das estações pluviométricas. Dessa forma, serão utilizados para tal finalidade as métricas estatísticas de performance, Correlações de Pearson (CP), Diferenças das Média (MD) e Raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e as Métricas Estatísticas de Contingência, Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR) e Índice de Sucesso Crítico (CSI), os quais serão detalhados nos itens que se seguem.

Foi empregada a correlação de Pearson (Eq.2 e Eq.3) utilizando como variáveis os dados pluviométricos das estações convencionais e os dados de precipitação do GPM.

A significância da correlação foi feita utilizando o teste estatístico para a significância t de duas amostras, com um nível de significância de 5%. E para as demais escalas temporais, foi utilizado somente a correlação de Pearson.

$$cov_{jk} \quad \text{Eq. 2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij}x_{ik}) - \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} \sum_{i=1}^n x_{ik}}{n}}{n - 1}$$

$$r = \frac{cov_{X,Y}}{S_X * S_Y} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde r é o coeficiente de correlação de Pearson, x_{ij} é o valor de x na linha i coluna j, x_{ik} é o valor de x na linha i coluna k, n é o número de amostras, $cov_{X,Y}$ é a covariância entre as duas variáveis, s_X é o desvio padrão da primeira variável e s_Y da segunda variável.

A Média das Diferenças Absolutas (MD) representa a diferença entre a precipitação média observada na estação pluviométrica e no produto do GPM. O MD é uma medida que possibilita estimar o quanto da precipitação do GPM superestima ou subestima a precipitação medida na estação pluviométrica (Eq. 4).

$$MD = \overline{GPM} - \overline{OBS} \quad \text{Eq. 4}$$

Quando MD for positivo, indica que o IMERG está superestimando o dado da estação pluviométrica e quando for negativo, subestimando.

A Diferença Relativa das Médias (RMD) (Eq. 5) é uma métrica que é utilizada para evidenciar (em porcentagem) os valores obtidos na Média das Diferenças Absolutas (MD).

$$RMD = \frac{\overline{GPM} - \overline{OBS}}{\overline{OBS}} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

A Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) é utilizada para quantificar o erro, de modo que quando menor o RMSE mais próxima é a relação entre o estimado do pelo GPM em relação a estação pluviométrica (Eq. 6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (GPM_n - OBS_n)^2} \quad \text{Eq. 6}$$

As Métricas Estatísticas de Contingência, Probabilidade de Detecção (POD) (Eq. 7), Taxa de Alarme Falso (FAR) (Eq. 8) e Índice de Sucesso Crítico (CSI) (Eq. 9), podem ser obtidas a partir das seguintes equações:

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad \text{Eq. 7}$$

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad \text{Eq. 8}$$

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde, *A*, *B* e *C* são:

- a:** número de eventos previstos que correspondem aos eventos observados (sucessos)
- b:** número de eventos previstos que não correspondem aos eventos observados (alarme falso)
- c:** número de eventos não previstos que correspondem aos observados (Rejeições corretas)

Equivalentemente:

- a** Dias com chuva na estação pluviométrica e no GPM
- b** Dias com chuva GPM e dias que não choveram no inmet
- c** Dias com chuva na estação pluviométrica e dias que não choveram no GPM

Foram aplicadas ao conjunto de dados o coeficiente de correlação, as quais foram feitas seguindo a seguinte lógica:

- I. Correlação Geral: agrupando todos os dados das estações com todos os respectivos dados do GPM;
- II. Correlação Pixel-a-Ponto: foram utilizadas somente as estações pluviométricas que estavam inseridas dentro da área do pixel do GPM correspondente;
- III. Unidade Geomorfológica: agrupando todos os dados das estações com todos os respectivos dados do GPM por unidade geomorfológica (Plano Intermediário e Rebordo)

Cada correlação supracitada, foi realizada considerando as seguintes escalas temporais: dado horário, acumulado de 3 horas, diário, mensal, trimestral e anual, utilizando os acumulados.

Para a Correlação Pixel-a-Ponto, foi analisado a influência na correlação quando considerado na análise somente o período de chuva, o período de chuva e o período de seca, somente os dias com chuva das estações pluviométricas, somente os dias com chuva do GPM e por fim, somente os dias com chuva nas estações pluviométricas e no GPM.

Para a Correlação por Unidade Geomorfológica, foi analisado a influência de analisar somente o período de chuva e posteriormente, período de chuva e o período de seca.

3.3.COMPILAÇÃO E TRATAMENTOS DOS DADOS

Para o pré-processamento dos dados foram utilizados os seguintes programas, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) QuantumGis versão 3.18 (QGIS, 2021) e ArcMap versão 10.6, PostgreSQL/PostGIS e Excel 365.

3.3.1. Uso e Cobertura da terra

Foram utilizados cinco Planos de Informação (PI) para elaborar o uso e cobertura final, sendo 4 PI associados a feições urbanas sendo eles: o sistema viário, calçadas e passeios, edificações e os estacionamentos, os quais foram obtidos a partir do aerolevanteamento da TerraCap (2016), com resolução de 0,5 m.

As feições relacionadas a vegetação natural, foram extraídas do uso e cobertura, com escala de 1:20.000, produzido a partir de imagens Sentinel 2 a partir de uma classificação não supervisionada, elaborado e disponível na IDE-DF, cujo ano de referência é 2019. Posteriormente compatibilizadas para as ortofotos de 2016. Todos os planos de informação supracitados estão disponíveis no site do GeoPortal (IDE/DF, 2022).

Foi realizada uma correção topológica, para eliminar sobreposições entre os polígonos e geometrias inválidas, tornando os dados topologicamente consistentes. As correções foram executadas utilizando o Postgis/PostgreSQL, com a função `ST_MakeValid`, a qual cria uma representação válida de uma determinada geometria inválida sem que haja perda de nenhum dos vértices de entrada, ou seja, a estrutura do objeto é simplesmente reorganizada, sem a perda do seu posicionamento original.

3.3.2. Sistema de Drenagem de Águas Pluviais

Os dados da rede de drenagem de águas pluviais foram obtidos a partir do convênio UNB-LSIE/ADASA/SDU em conjunto com os órgãos públicos responsáveis do Distrito Federal (como Novacap, Metro e DER).

O convênio supracitado teve como finalidade cadastrar e verificar em campo a rede de drenagem de águas pluviais e produzir modelos de alagamento.

A rede de drenagem de água pluvial que foi utilizada é composta dos seguintes elementos: bocas de lobo e bueiros, que constituem os *Inlets* (entrada); os poços de visita, caixas de passagem e conectividades que são considerados com as *junctions* (junção); os

lançamentos que são os *outlets* (saída); e, todas as tubulações (ramal e coletor) constituem a camada de *conduits* (condutos).

Foi realizada uma correção topológica visando ajustar algumas inconsistências encontradas na rede, as quais estão representas esquematicamente na Figura 26, como por exemplo, redes não conectadas, com ausência de entradas e de junções, rede duplicada e inversão de sentido dos condutos.

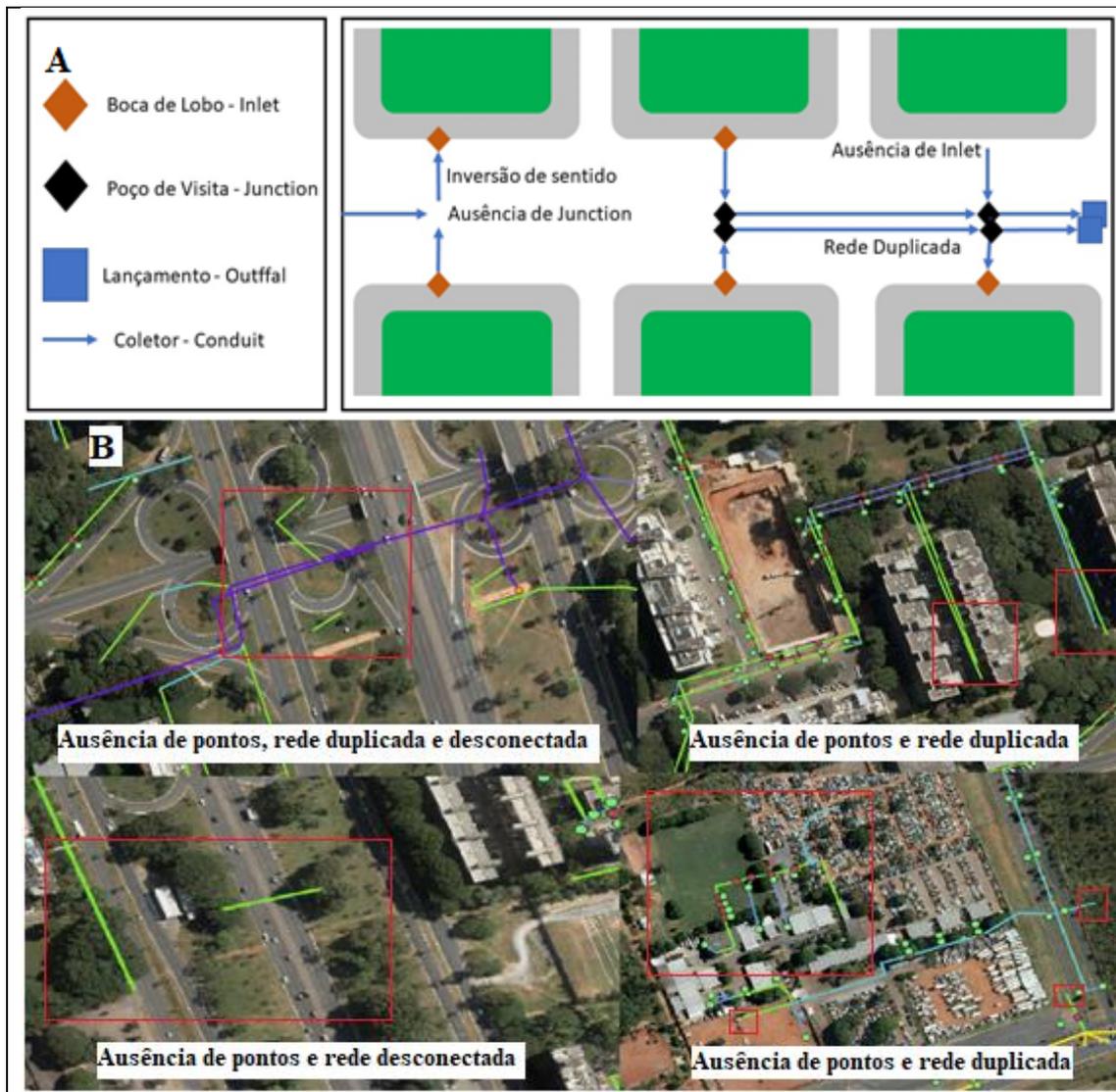


Figura 26 – A figura (A) apresenta um esquema das inconsistências e a figura (B) apresenta exemplos com a rede utilizada

Para verificar as redes duplicadas foi utilizado a regra topológica “*Lines must not have duplicates*”. Já para verificar os segmentos de linha sem pontos foi utilizado a regra topológica “*Points must be covered by*” e de pontos duplicados “*Points must not have duplicates*”. Para todos os dados foi aplicado a regra “*Lines must not have invalid*”

geometries” e *“Points must not have invalid geometries”* para verificar a existência de geometrias inválidas.

Foi encontrada incongruência associada a falta de conexão na rede, esses problemas foram ajustados manualmente. A falta de conexão pode ocorrer nas plantas mais antigas, referente ao que foi projetado inicialmente, que as vezes podem divergir do que foi executado. Quando a conexão da rede não era possível, mesmo com a verificação em campo, o trecho desconectado foi excluído.

Foi observado que muitos trechos de rede coletora haviam sido vetorizados de forma contigua, de modo que havia um único segmento de coletor se sobrepondo a outro, porém não conectado, aos pontos de junção ou entradas (Figura 27), esses casos podem estar associados ao formato das plantas, usualmente elaborados em CAD e posteriormente transformadas em *shapefile*. A correção foi feita de forma manual, conectando as linhas aos pontos.

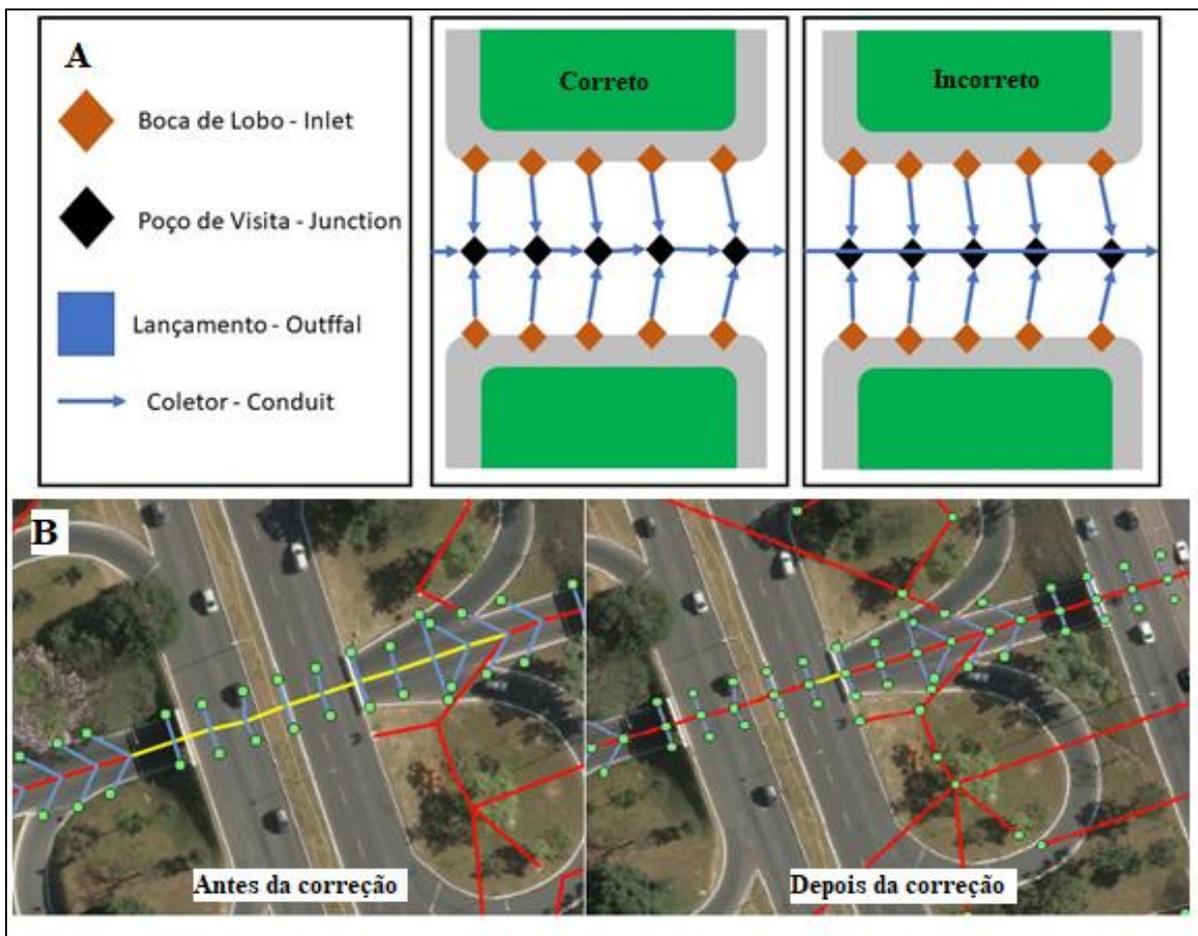


Figura 27 - A figura (A) apresenta um esquema com a forma correta de como devem estar os segmentos de condutos e a forma incorreta de alguns trechos da rede de drenagem de águas pluviais que foram encontrados; e a figura (B) apresenta um exemplo real da rede de drenagem de águas pluviais antes e depois da correção.

Foi observado ainda que alguns trechos dos condutos apresentavam comprimentos menores que 1 metro ou até mesmo centimétrico, podendo sugerir erros de vetorização ou das próprias plantas encaminhadas em formato CAD.

Dessa forma, o comprimento dos condutos foi ajustado manualmente até que atingissem o comprimento da lateral do elemento da malha (2 m), sendo esse um requisito do modelo. Visto que, de acordo com a documentação do FLO-2D (FLO-2D, 2021) condutos com comprimentos menores que o lado do elemento podem gerar instabilidade no modelo.

Ao final das correções topológicas, simulou-se um cenário ideal com pontos de entrada e saída de água, como mostra o esquema simplificado na Figura 28.

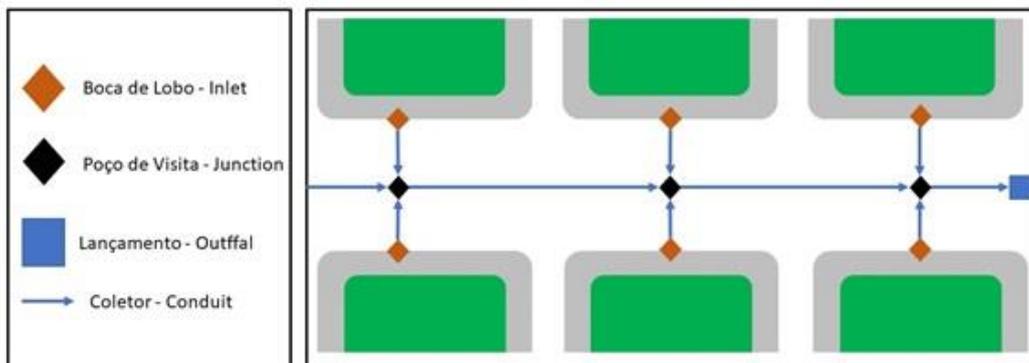


Figura 28 – Esquema ideal resumido da rede de drenagem pluvial.

Após as correções supracitadas, a tabela de atributos de cada PI foi estruturada (entradas+junções, saídas e coletores), de modo que as colunas já existentes foram compatibilizadas para adequá-las as propriedades requisitadas pelo FLO2D e do SWMM.

Considerando o volume de dados utilizado, foi necessário adotar algumas simplificações para tornar viável a modelagem, sendo elas:

- Dimensão da boca do lobo: Foi adotado 1,5 m de largura (L) e 0,35 m (H) de altura da abertura que normalmente são padronizadas (dimensões obtidas a partir de uma medição de uma boca de lobo do estacionamento do Prédio do ICC Norte na Universidade de Brasília) (Figura 29).

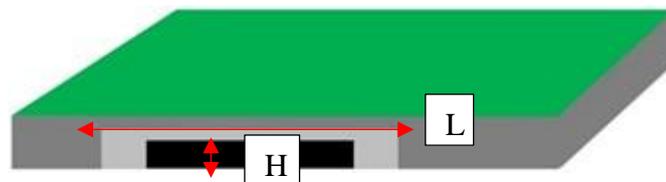


Figura 29 – Representação da boca de lobo adotada.

- Cotas de fundo (*invert elevation*) das junções: nas junções com ausência de profundidade e de cota de fundo, foi adotado um valor médio considerando o conjunto de dados disponível, e quando a lacuna estava associada a cota de superfície, foi utilizado o MDT elaborado como referência para a cota de superfície.
- Os condutos com ausência de diâmetro foram revisados manualmente e adotado o diâmetro do segmento anterior ou posterior ao segmento sem informação. O formato (*shape*) adotado foi o Circular.
- Para a rugosidade inicial, adotada para os coletores 0,011, considerando o material concreto.
- Para as saídas da rede de drenagem pluvial foram adotadas o fluxo de retorno livre e sem tampa.

3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTERFACE GRÁFICA DO MODELO FLO-2D NO QGIS

O modelo FLO-2D atualmente, possibilita que o usuário utilize o SIG QuantumGis como interfase gráfica para a criação do projeto, inserção e manipulação dos dados de entrada, através de um *plugin* do próprio modelo (Figura 30).

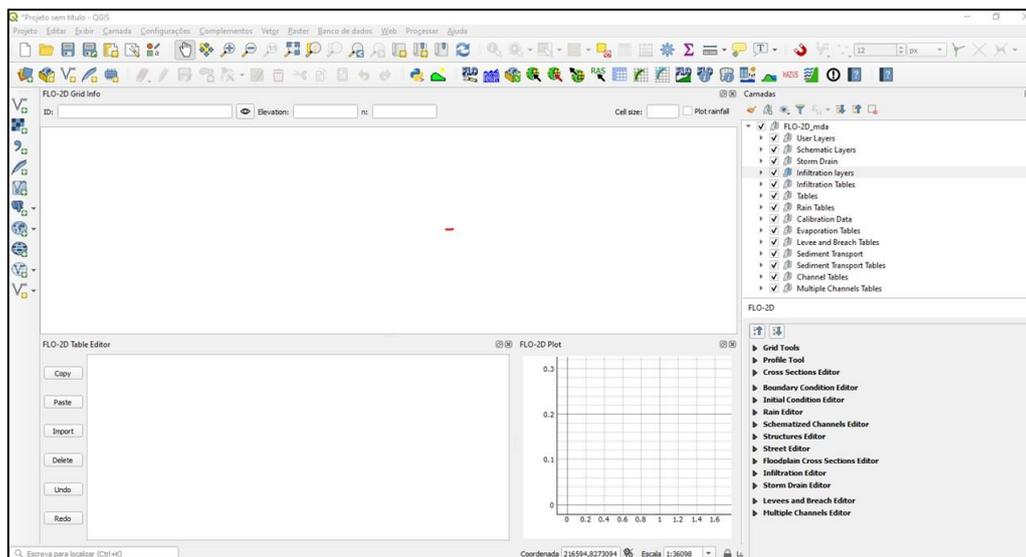


Figura 30 - Interface gráfica do modelo FLO-2D através do SIG Quantum GIS. Em vermelho são as aplicações do *plugin*.

Ao iniciar o projeto, são criados dois grupos de conjuntos de dados (*group layer*), o primeiro associado as camadas que o usuário pode editar (*User Layers*), e as camadas

esquemáticas (*Schematic Layers*), que recebem as informações contidas nas camadas editáveis (Figura 31).

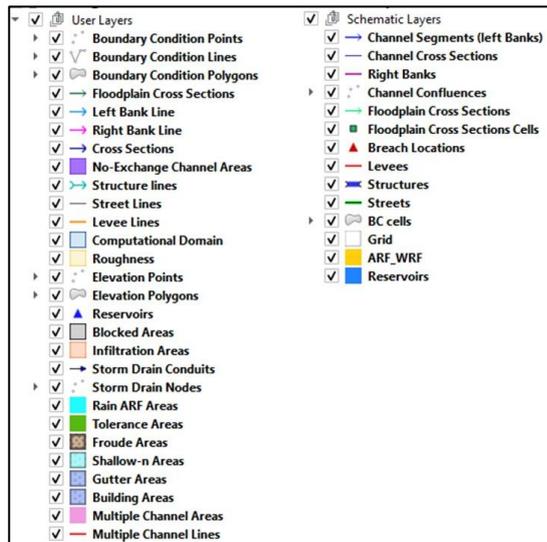


Figura 31 – Conjunto de camadas editáveis e das camadas esquemáticas, do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica.

As camadas podem ser editadas através do conjunto de ferramentas do próprio *plugin* do modelo FLO-2D (Figura 32) ou inseridas no projeto do modelo realizando uma inclusão da camada original na camada editável.



Figura 32 – Caixa de ferramentas do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica.

No que tange a inclusão da camada original na camada editável, cabe ressaltar que caso a camada original tenha problemas de geometrias inválidas, esse procedimento não

ocorrerá de forma correta, devendo o dado original estar topologicamente consistente para ser incluído no modelo.

Os dados inseridos na camada editável são atribuídos as camadas esquemáticas, através de uma função do *plugin*, que possibilita também que as informações das camadas esquemáticas sejam atribuídas as camadas editáveis (Figura 33)

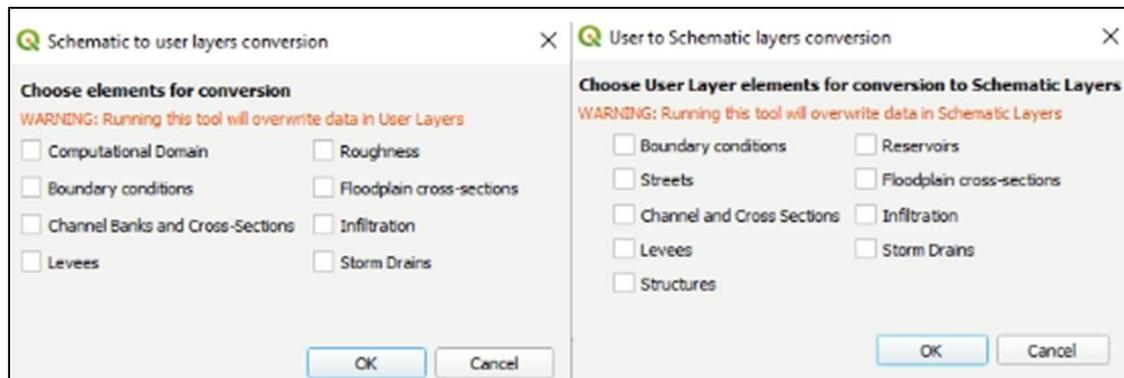


Figura 33 – Ferramentas de transformação, *user layer – schematic layers* do modelo FLO-2D, utilizando o QGIS como interface gráfica.

Ao final do processo de inclusão dos dados de entrada, os mesmos são convertidos em arquivos com a extensão .DAT, os quais são lidos pelo modelo FLO-2D. Ao final da simulação, é gerado pelo próprio modelo arquivos com a extensão .OUT (arquivos de saída), .CHK (arquivos de verificação) e RGH (arquivos que dados ajustados ou informações sobre ajustes internos que foram feitos pelo modelo durante a simulação).

3.4.1. Considerações sobre a construção do modelo

Inicialmente, foi criado o projeto, a qual fica armazenado em um arquivo *geopackage*, e definido o tamanho dos elementos da malha e o sistema de referência geográfica que será adotado. Foi adotado um tempo de simulação de 24 horas, com uma duração de precipitação de 12 horas e um intervalo de tempo de 0,01 horas.

Foi definido uma resolução de 2 m, visando compatibilizar com a escala do Modelo Digital de Terreno e adotar uma escala que possibilite a representação das feições contidas no ambiente urbano, como as edificações e as ruas.

Cada elemento da malha numérica recebe, automaticamente, um código identificador único, na Figura 34 é apresentado um trecho da malha numérica com detalhe e, na Figura 35 um exemplo esquemático de uma malha numérica para toda a bacia hidrográfica.

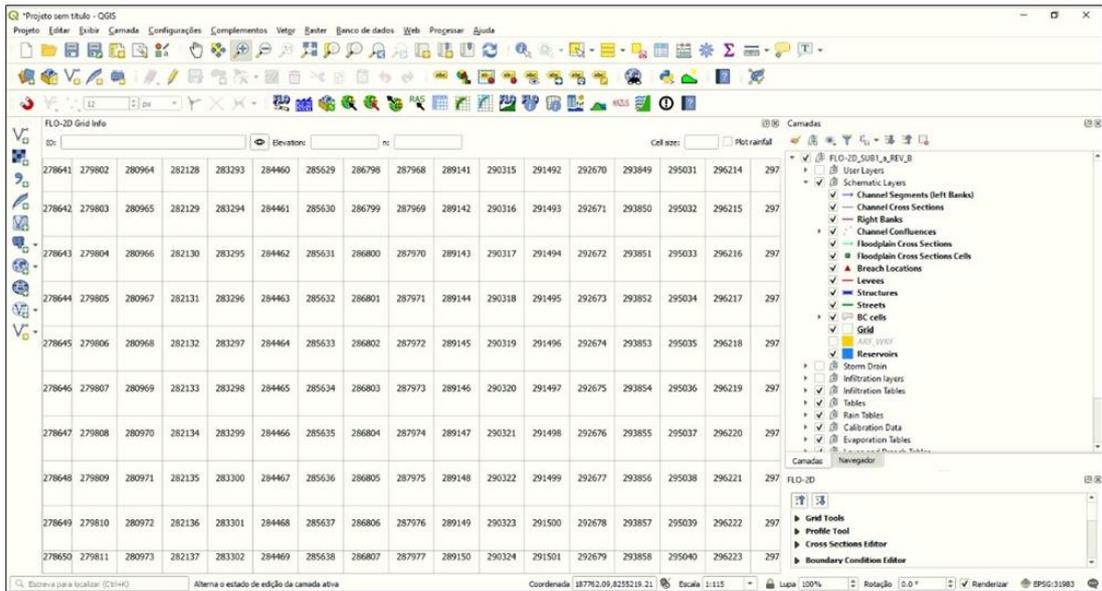


Figura 34 - Representação com aproximação da malha numérica e dos elementos, utilizando a interface gráfica do modelo FLO-2D através do *plugin* no SIG Quantum GIS.

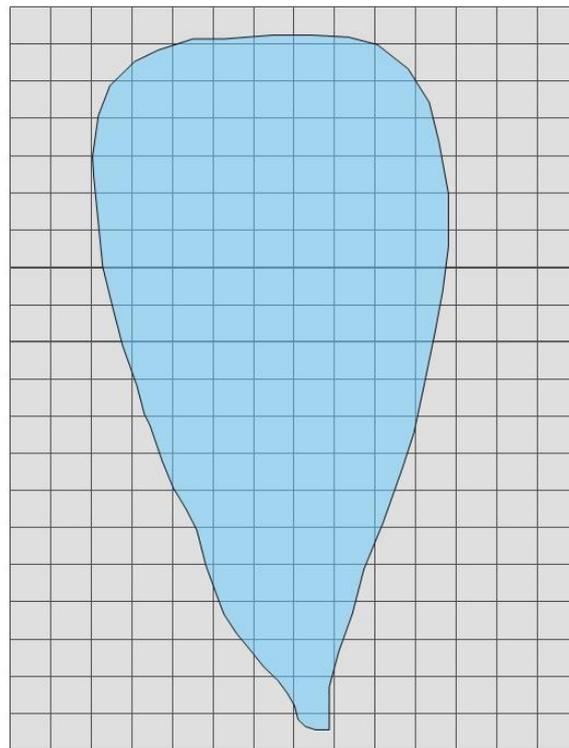


Figura 35 - Esquema de representação da malha numérica para uma bacia hidrográfica no modelo FLO-2D.

A elevação do Modelo Digital de Terreno (MDT) é atribuída a cada elemento da malha, sendo essencial que a escala do MDT e da malha de cálculo sejam compatíveis, caso contrário o modelo não consiga executar essa agregação.

Foi utilizado o método *building block* para representar as edificações através do Fator de Redução de Área - ARF (Figura 36) (CHEN et al., 2012a; CHEN et al., 2012b). Para utilização dessa abordagem, é necessário que o tamanho da célula computacional e a resolução do DEM sejam menores que a escala do edifício (SHEN e TAN, 2020), não sendo adequado para resoluções de malha com pouco detalhamento.

Para representar as edificações, foi utilizado o plano de informação de edificações com escala 1:500 e a função do modelo FLO-2D que calcula a porcentagem de área do elemento que está totalmente ou parcialmente bloqueado. De modo que, nas áreas cujos elementos estão totalmente bloqueados, não há o fluxo de água dos elementos adjacente para o elemento bloqueado, somente do elemento bloqueado para os elementos adjacentes.

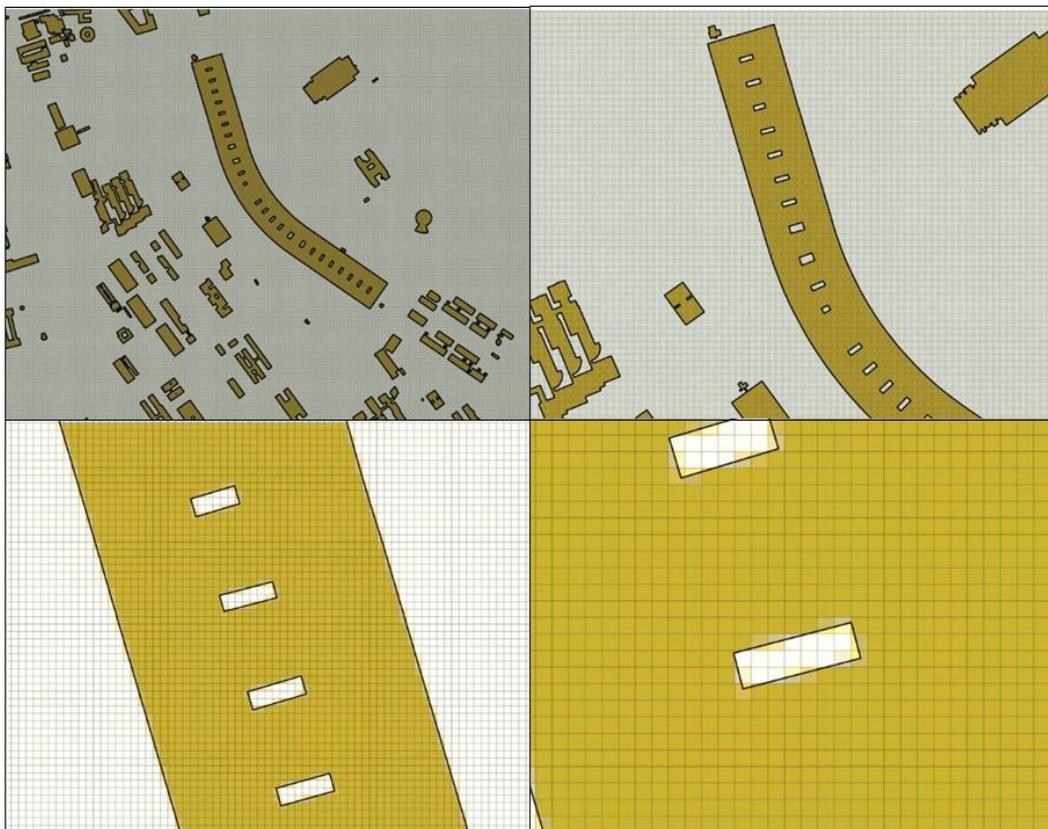


Figura 36 - Representação da Áreas Bloqueadas através do Fator de Redução de Área - ARF no modelo FLO-2D.

O ARF reduz a área de superfície do elemento disponível para armazenamento do volume de alagamento, simulando o comportamento de áreas edificadas. Uma única edificação pode ser representada por um ou um conjunto de elementos, a depender da resolução da malha e da área edificada (Figura 37).

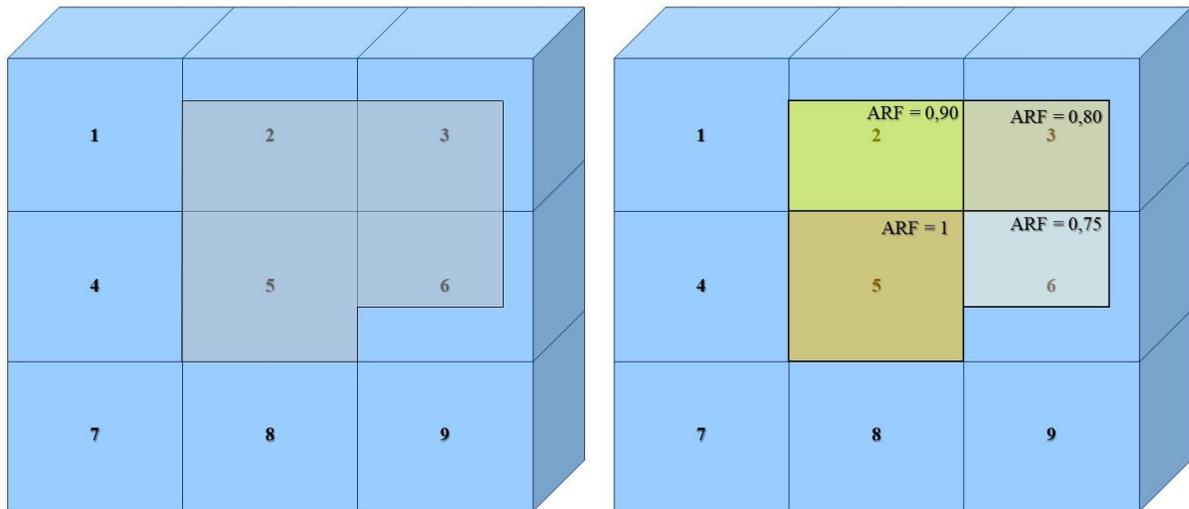


Figura 37 – Exemplo de malha regular quadrada com Fator de Redução de Área - (ARF) aplicado para uma edificação.

Dessa forma, o valor de ARF varia de 0 a 1,0 (0 a 100%), quando mais próximo de 1 menor é a área do elemento disponível para armazenamento, de modo que a depender da área edificada um conjunto de elementos pode ficar totalmente bloqueado e outro conjunto de elementos pode ficar parcialmente bloqueado. Inicialmente, foram adotados os valores de ARF calculados pelo modelo.

O plano de informação de uso e cobertura da terra foi utilizado em dois momentos: na atribuição dos valores de rugosidade de *manning* da superfície (n) em função das classes de uso e cobertura; e, posteriormente, na utilização junto ao plano de informação de solos hidrológicos para definir os valores de *Curve Number* – CN ou Curva Número, para o cálculo do potencial de infiltração.

Os valores de n e CN foram definidos com base em pesquisas bibliográficas, fazendo uma compilação de diversos autores e manuais. No caso do CN buscou-se sempre que possível, adotar valores compatíveis com os solos e clima local e para a rugosidade da superfície a partir da compilação foram definidos os valores médios, mínimos e máximos.

Como citado, foi elaborado o plano de informação de CN utilizando os valores apresentados na Tabela 8, o qual será apresentado posteriormente nos resultados. Dessa forma, o modelo de infiltração adotado foi o *US Soil Conservation Service* (SCS, 1972; NRCS, 1986), partindo do pressuposto que a condição antecedente de umidade II (intermediária).

Tabela 8 - Valores de Curva Número (CN) para cada tipo de solo e classe de uso e cobertura.

| Classe de Uso e Cobertura do Solo | Grupo Hidrológico | | | | Fonte |
|---------------------------------------|-------------------|----|----|----|--------------------------------|
| | A | B | C | D | |
| Sistema viário | 98 | 98 | 98 | 98 | (Sartori (2010); Alves (2016)) |
| Estacionamento | 98 | 98 | 98 | 98 | |
| Passeio e Calçada | 98 | 98 | 98 | 98 | |
| Quadras | 98 | 98 | 98 | 98 | |
| Cerrado (Normal) | 30 | 35 | 40 | 45 | (Sartori (2010); Alves (2016)) |
| Canteiro Central (vegetação Rasteira) | 68 | 79 | 89 | 89 | |
| Formação Florestal | 25 | 30 | 35 | 40 | Chaves (2016) |
| Formação Campestre | 49 | 69 | 79 | 84 | (Castro (2013); Chaves (2016)) |
| Formação Savânica | 30 | 40 | 45 | 45 | Chaves (2016) |
| Solo Exposto | 59 | 74 | 82 | 89 | |

Os parâmetros de infiltração foram atribuídos de maneira espacializada, ou seja, cada elemento da malha contém um valor de CN, o que significa que para cada elemento será calculado uma taxa de infiltração, resultando do CN e demais iterações. Nos elementos que foram definidos como bloqueados (edificações), não há armazenamento nesses elementos quando totalmente bloqueados.

A abstração inicial, quando utilizado o método SCS é calculada automaticamente pelo modelo e para o armazenamento de depressão foi definido um valor global, considerando o intervalo sugerido pelo modelo (0,001 a 0,03 m). De modo que, os alagamentos só começam a ocorrer depois que o armazenamento de depressão é preenchido.

As ‘tesourinhas’ e as passagens subterrâneas foram representadas utilizando a ferramenta de ‘estruturas hidráulicas’, cuja finalidade é de representar pontes e viadutos, promovendo o fluxo de escoamento entre esses elementos (Figura 38)



Figura 38 – Representação e um exemplo esquemático de uma estrutura hidráulica no modelo FLO-2D.

Os dados globais do modelo, como o tempo de simulação, o intervalo de tempo utilizado e quais as funções o modelo deve habilitar na simulação, são inseridos através da janela ‘FLO-2D *Control and Tolerance Variables*’ ou Variáveis de Controle (Figura 39) e Tolerância (Figura 40).

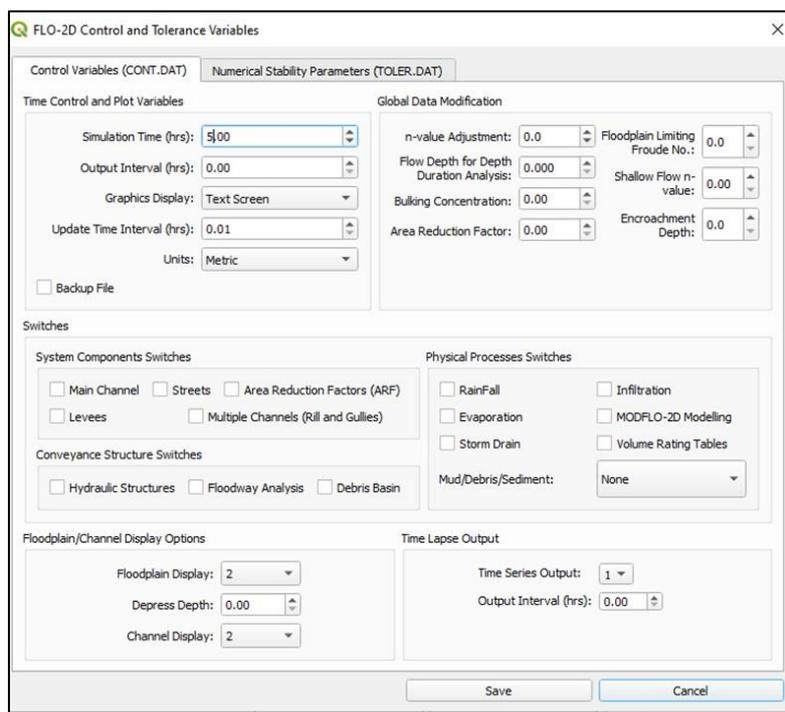


Figura 39 – Janela onde são inseridas as variáveis de controle, as quais são armazenadas no arquivo CONT.DAT, do modelo FLO-2D.

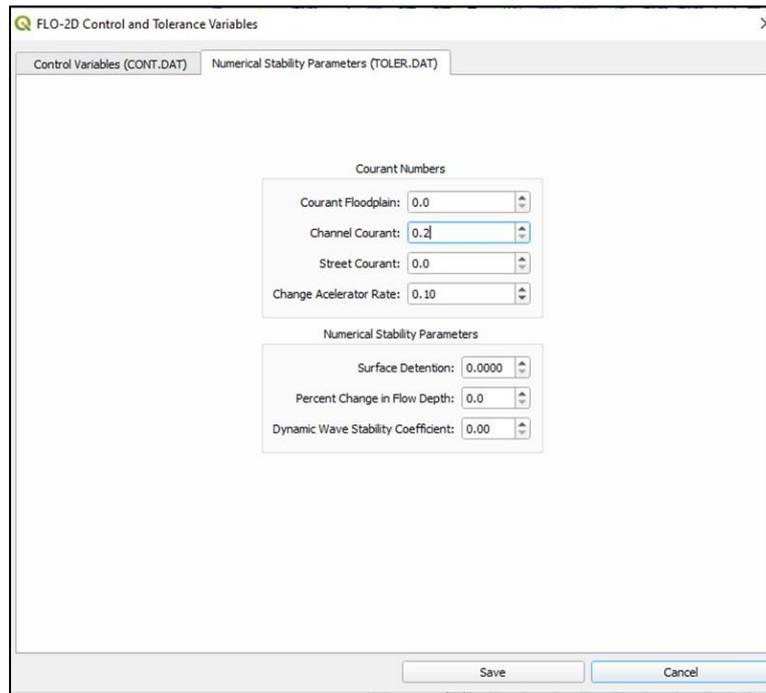


Figura 40 - Janela onde são inseridas as variáveis de tolerância, as quais são armazenadas no arquivo TOLER.DAT, do modelo FLO-2D.

3.5.MODELAGEM HIDROLOFICA-HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL

A modelagem hidrodinâmica bidimensional foi realizada utilizando o programa FLO-2D que utiliza a Equação de Águas Rasas em sua forma completa. O FLO-2D é capaz de simular os processos físicos, hidrológicos e hidráulicos de superfície, sendo acoplado a um modelo hidráulico (SWMM) para propagação de fluxo em condutos fechados.

É um modelo distribuído, cujo parâmetros de entrada são atribuídos a cada elemento da malha de cálculo. Por não possuir solução analítica, utiliza o método de diferenças finitas em uma malha de cálculo quadrática e uniforme, no espaço e no tempo (FLO-2D, 2021). Na Quadro 7 estão compilados os dados e informações que foram utilizados para realizar a modelagem.

Quadro 7 - Compilação dos dados de entrada do modelo

| Planos de Informação | Escala/Resolução | |
|---|------------------|--------------|
| | Espacial | Fonte |
| Modelo Digital de Elevação – MDT (Lidar) | 1:2.000 | IDE/DF, 2022 |

| Planos de Informação | Escala/Resolução Espacial | Fonte |
|--|---------------------------|--|
| Sistema Viário, Calçadas e Passeios, Edificações e Estacionamentos | 1:500 | IDE/DF, 2022 |
| (Vegetação Natural) Uso e Cobertura do Solo | 1:20.000 | IDE/DF, 2022 |
| Hidrogeologia | 1:250.000 | SISDIA (Sema) |
| Precipitação de tempo de retorno (Curva IDF) | - | Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais (2018) |
| Rede de Drenagem Pluvial | Levantamento de Campo | ADASA |

O processo de modelagem seguiu as etapas descritas no fluxograma da Figura 41.

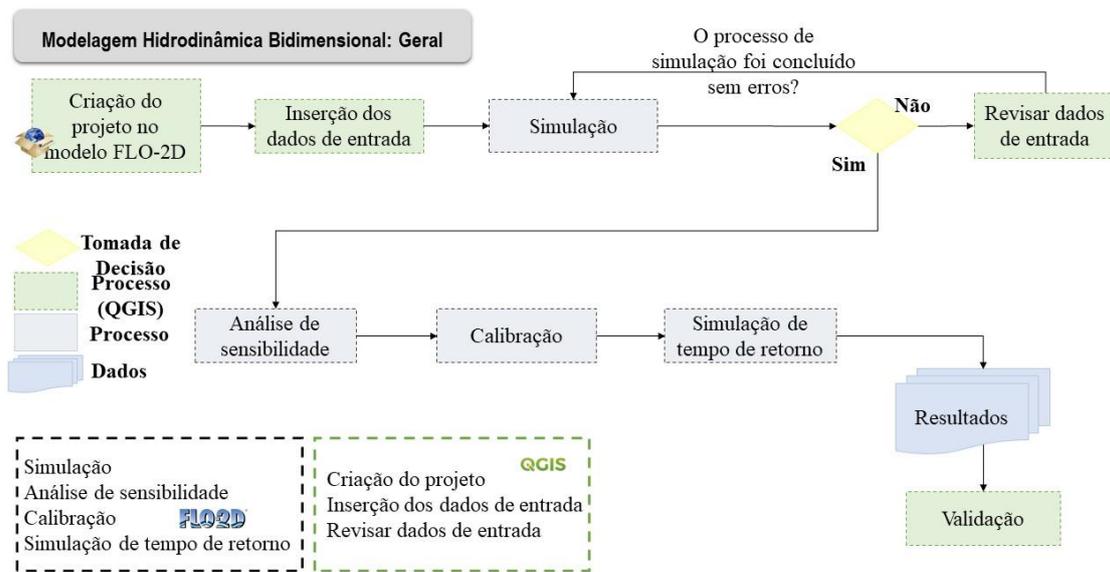


Figura 41 – Etapas gerais do processo de modelagem
Fonte: Adaptado de FLO-2D (2021)

3.5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

A calibração teve como finalidade ajustar o modelo, independentemente de onde seja empregado e das precipitações utilizadas (JODHANI et al., 2021). Para isso, foi utilizado um evento de precipitação (Tabela 9), de modo que esse evento foi simulado três vezes variando a rugosidade da superfície (mínimo, médio e máximo) e mantendo os

demais parâmetros, visando identificar qual o impactado que os valores de n tem na extensão da mancha e nas velocidades máximas.

Tabela 9 - Precipitação total do evento simulado e a duração do hietograma de chuva

| Sub-Bacia | Evento | Precipitação Evento Chuvoso (mm) | Duração Do Hietograma (horas) | Intervalo de Tempo de Retorno (Anos) |
|---------------------------------------|----------|--|----------------------------------|--|
| SUB1 – Asa Norte (Plano Piloto) | 17/12/14 | 74,93 | 4,5 | 5 - 10 |

Esse evento foi escolhido pois se enquadra no intervalo de tempo de retorno relativo a microdrenagem, que poderá ser de 2 a 5 anos para usos residências, comerciais e de prédios públicos e de 5 a 10 anos para áreas comerciais e avenidas (PDDU, 2009).

Devido à falta de dados de monitoramento *in loco* sobre eventos de alagamentos, a calibração buscou alcançar um modelo numericamente estável, observando a conservação do volume, as alturas de lâmina de água e velocidades de escoamento máximas. Os pontos de notificações de alagamento também foram utilizados de modo a avaliar se a extensão da mancha alagada simulada contemplava os pontos cadastrados.

Um modelo numericamente estável é aquele capaz de gerar uma solução computacional próxima à solução analítica ou exata (FLO-2D, 2021). De modo que, mesmo diante perturbações, conseguisse produzir resultados racionais. A estabilidade numérica é alcançada, quando os critérios das variáveis que promovem a estabilidade do modelo são atendidos, sendo a conservação do volume uma medida de precisão resultante da estabilidade.

A conservação do volume representa a relação do volume de entrada, volume de saída, mudanças no armazenamento e perdas (infiltração) somados, em cada intervalo de tempo (*timestep*), sendo armazenado no arquivo SUMMARY.OUT. De acordo com a documentação teórica, o volume deve ser conservado dentro de uma fração de um por cento, sendo a conservação de volume com 0,001% muito precisa.

A velocidade de propagação da onda de inundação/alagamento produzida durante a simulação é essencialmente controlada pela topográfica/declividade da área e pelos parâmetros associados a resistência ao fluxo (FLO-2D, 2021).

Alguma das variáveis que controlam a estabilidade numérica, associados a resistência ao fluxo, ficam armazenados no arquivo TOLER.DAT, tais como o Número

de *Courant* e a variável que controla a velocidade com que ocorre o incremento de tempo (TIME_ACCEL).

O Número de *Courant* exerce influência na velocidade de propagação da onda de alagamento, de modo que, quanto maior o seu valor, mais rápido a onda de inundação/alagamento é propagada. Uma das causas de instabilidade ocorrem quando o elemento da malha tem uma resolução de muito detalhe e o Número de *Courant* é muito alto, fazendo com que a onda de inundação/alagamento seja propagada no elemento sem que o passo de tempo tenha sido finalizado. As simulações iniciaram utilizando o valor padrão do Número de *Courant* (0,6), de modo que, durante a calibração esse valor foi ajustado, sendo utilizado para as simulações dos diferentes tempos de retorno o valor de 0,4.

Para o TIME_ACCEL (adimensional), foi adotado o valor padrão de 0,1 mais conservador, que embora resulte em uma simulação mais lenta, resulta em uma simulação mais estável, conforme recomendado pelo modelo (FLO-2D, 2021).

Em paralelo, foram definidos os valores de limite do número de *Froude* e *Shallow Flow n-value* (ambos considerando a planície inundação) apropriados, para que concomitante sejam calibrados os valores de rugosidade de *manning* da superfície (*n*).

O limite do número de *Froude* (adimensional), representa a relação da força da inercia e da gravidade (TUCCI, 2005), dessa forma, contribui para compreender o movimento das ondas de alagamento, considerando a influência da gravidade no padrão de fluxo (FLO-2D, 2021). A documentação do modelo FLO-2D sugere valores entre 0,5 a 0,8 para o limite do número de *Froude* para planície de inundação.

Quando o número de *Froude* e o número de *Courant* definidos são excedidos em relação ao valor calculado, consecutivas vezes no mesmo elemento, automaticamente, o modelo realiza um ajuste, gerando um incremento, no valor *n* durante a simulação, tendendo a estabilizar o modelo.

Quando o modelo estabiliza, e o número de *Froude* e o número de *Courant* não são mais excedidos, o valor *n* reduz gradativamente, até que o valor original seja novamente alcançado.

Os valores de rugosidade de *manning* da superfície ajustados, são listados em dois arquivos, o ROUGH.OUT e no MANNINGS_N.RGH. O ROUGH.OUT, relata quais os valores de *n* foram ajustados automaticamente e em qual momento da simulação. O MANNINGS_N.RGH é um arquivo de revisão/duplicado do MANNINGS_N.DAT,

contendo as alterações no valor n relatadas no arquivo ROUGH.OUT, para cada elemento da malha. De modo que, o ajuste da rugosidade de *manning* da superfície proposto pelo modelo, deve ser revisado, visando não adotar valores que não representem a realidade.

O Fator de Redução de Área – ARF, é armazenado no arquivo ARF.DAT, o qual foi ajustado durante a calibração visando reduzir a instabilidade que poderia ocorrer devido à: a) baixa disponibilidade de área para armazenamento dentro de alguns elementos; e b) devido a declividade que estaria sendo gerada dentro do elemento, quando parcialmente bloqueado, podendo suscitar em velocidade irreais.

Por fim, cabe ressaltar que é imprescindível que o intervalo de tempo (*timestep*) adotado seja compatível para integrar os processos de superfície (a onda de inundação/alagamento em superfície) e os processos hidráulicos dos condutos.

A estabilidade numérica requer que o intervalo de tempo adotado seja menor do que o tempo que leva para uma onda dinâmica viajar pelo conduto mais curto no sistema de drenagem pluvial (FLO-2D, 2021). Dessa forma, nas simulações de tempo de retorno foi adotado um intervalo de tempo de 5 minutos. Essa etapa é repedida até que a estabilidade numérica e a conservação do volume sejam atendidas.

De forma resumida, a calibração seguiu as seguintes etapas apresentadas no fluxograma da Figura 42.

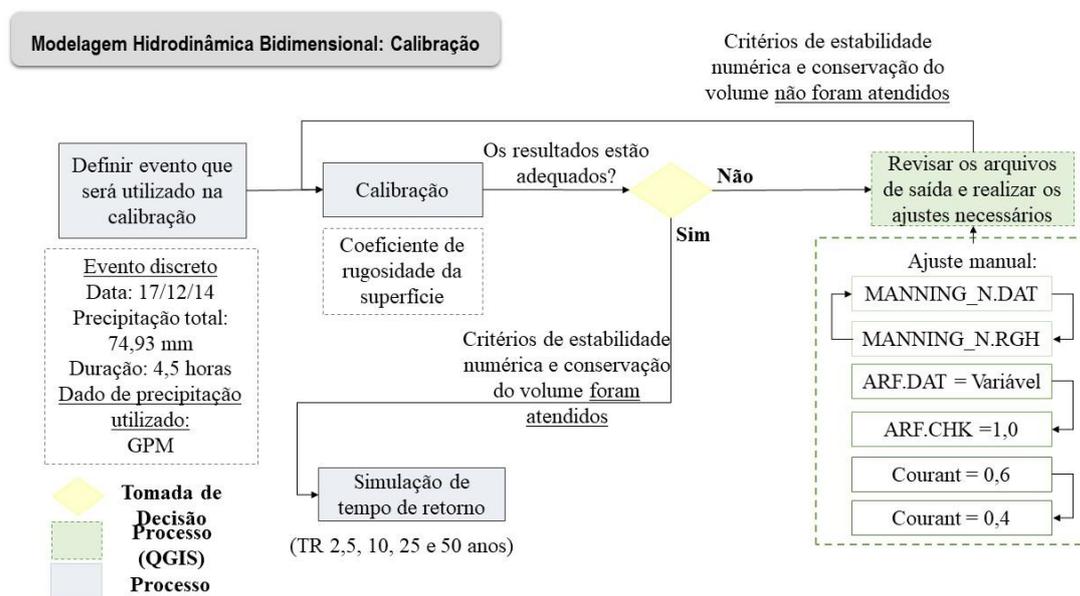


Figura 42 – Fluxograma resumindo as etapas de calibração

3.5.2. PRECIPITAÇÃO DE TEMPO DE RETORNO

As Precipitações de Tempo de Retorno podem ser entendidas como a probabilidade de uma chuva seja igualada ou superada em tempo de recorrência em um intervalo de t anos qualquer (Eq. 10):

$$F = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^t = 1 - (1 - p)^t \quad \text{Eq. 10}$$

De modo que, seja probabilidade de uma chuva qualquer ocorrer em um ano, quaisquer sejam $p = 1/TR$, e o tempo de retorno (TR), é a probabilidade desse evento não ocorrer $(1 - p)$. As simulações serão realizadas utilizando precipitações de tempo de retorno 2, 5, 10, 25 e 50 anos, as quais foram obtidas por meio da curva IDF do Distrito Federal (Eq. 11) (PDDU, 2009) e discretizada utilizando método dos blocos alternados para uma duração de 12 horas hora com intervalos de 5 minutos (Figura 43).

$$i = \frac{1574,7 \cdot TR^{0,207}}{(tc + 11)^{0,884}} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde, i é a intensidade da chuva em mm/h; TR é o tempo de recorrência em anos e tc é a duração da chuva em min.

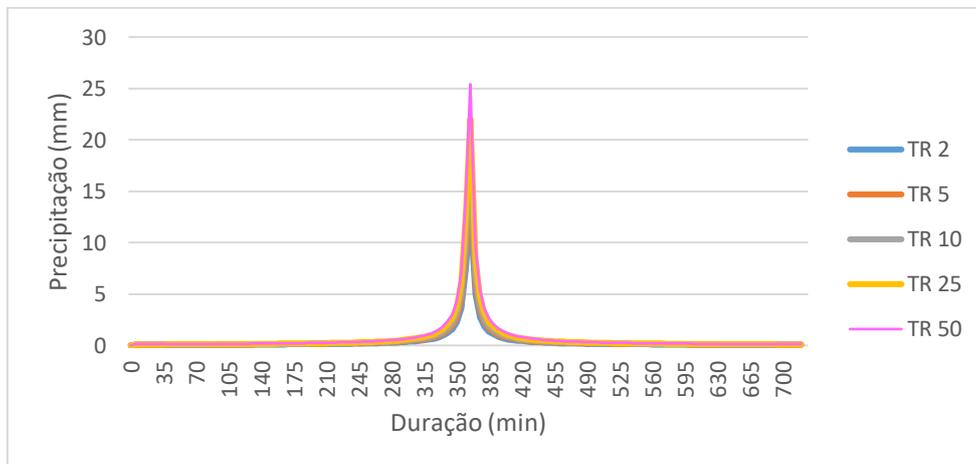


Figura 43 - Exemplo de hietograma utilizado na pesquisa 720 minutos

3.5.3. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados das simulações (utilizadas para calibração e de tempo de retorno) serão comparados com os pontos de notificações de alagamento do banco de dados espacializado das informações cadastradas sobre alagamentos no Distrito Federal, entre 1999 e 2020.

A comparação entre as simulações e os pontos de notificações de alagamento foi para verificar se o modelo conseguiu prever os alagamentos nos pontos mais notificados. Para isso, foi realizado uma sobreposição entre as manchas de alagamentos simuladas e os pontos de notificações de alagamento.

Este procedimento visa entender melhor se há uma aproximação entre os pontos e as manchas, além do grau de aderência das manchas de alagamento com o fluxo acumulado da bacia hidrográfica.

A validação desse trabalho foi realizada em duas etapas, utilizando as bacias da Asa Norte – Plano Piloto como referência:

- I. a primeira consistiu em verificar a aderência dos pontos de notificações de alagamento em relação a mancha alagada, por tempo de retorno; e,
- II. a segunda etapa, aplicação da métrica estatística MD para verificar o erro entre o valor de lâmina de água máxima simulado e o valor de lâmina de água cadastrado nos pontos de notificações de alagamento, quando intersectarem a mancha alagada e houver dado de altura de lâmina de água cadastrada.

Para os pontos da Asa Norte, foram área foram calculados os tempos de retorno de cada notificação de alagamento considerando a precipitação acumulada em 24 horas (diária), de modo que, a sobreposição dos pontos com a mancha alagada fora realizada por tempo de retorno.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ALAGAMENTOS NO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DADOS CIDADÃOS

O cadastro inicial realizado por Batista (2014) para o período de janeiro de 1999 a março de 2013 continha 373 notificações de alagamentos, após a atualização realizada neste trabalho foi acrescido 479 novas notificações de alagamento, compreendendo o período de mar/2013 a dez/2020, totalizando 851 notificações e um período de 20 anos, de janeiro de 1999 a dezembro de 2020 (Figura 44).

Quando analisado a distribuição de notificações ao longo dos anos, observa-se inicialmente que em um período de 7 anos (março/2013 a 2020) houve um incremento de 56,06% de notificações em relação ao cadastrado inicial que 373 notificações de alagamento.

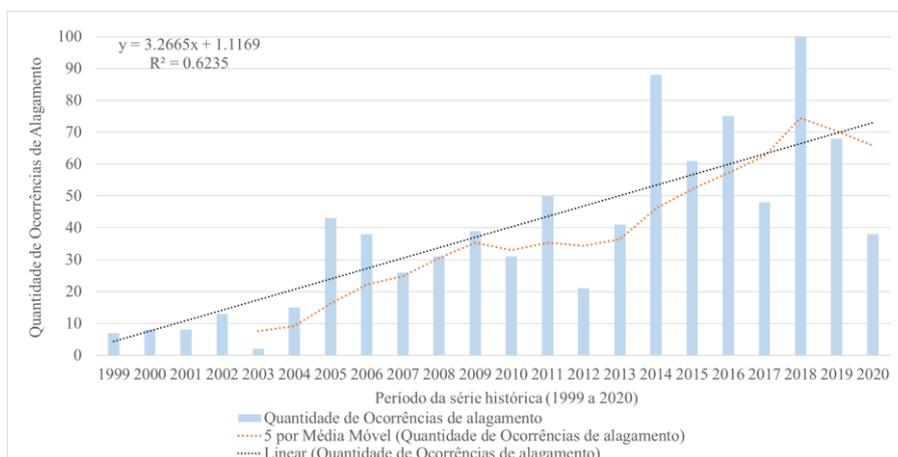


Figura 44 – Média móvel de cinco anos das notificações de alagamento ao longo dos anos no Distrito Federal. Descrição: Linha vermelha representa a média móvel de 5 anos; linha preta representa a linha de tendência (linear); e, Barras azuis, quantidade de alagamentos ao longo dos anos.

De acordo com a Figura 44, a média móvel de 5 anos apresentada, mostra uma tendência de crescimento das notificações, além disso é possível observar que esse crescimento apresenta uma tendência de crescimento que se aproxima do linear, com coeficiente de determinação ajustado (R^2) de 0,62.

Considerando a atual mancha de ocupação urbana consolidada, 93% das notificações de alagamento ocorrem nessas áreas, de modo que, as notificações são mais expressivas na Região Administrativa de Vicente Pires com 103 notificações e na Região Administrativa do Plano Piloto com 382 (Figura 45 e Figura 46).

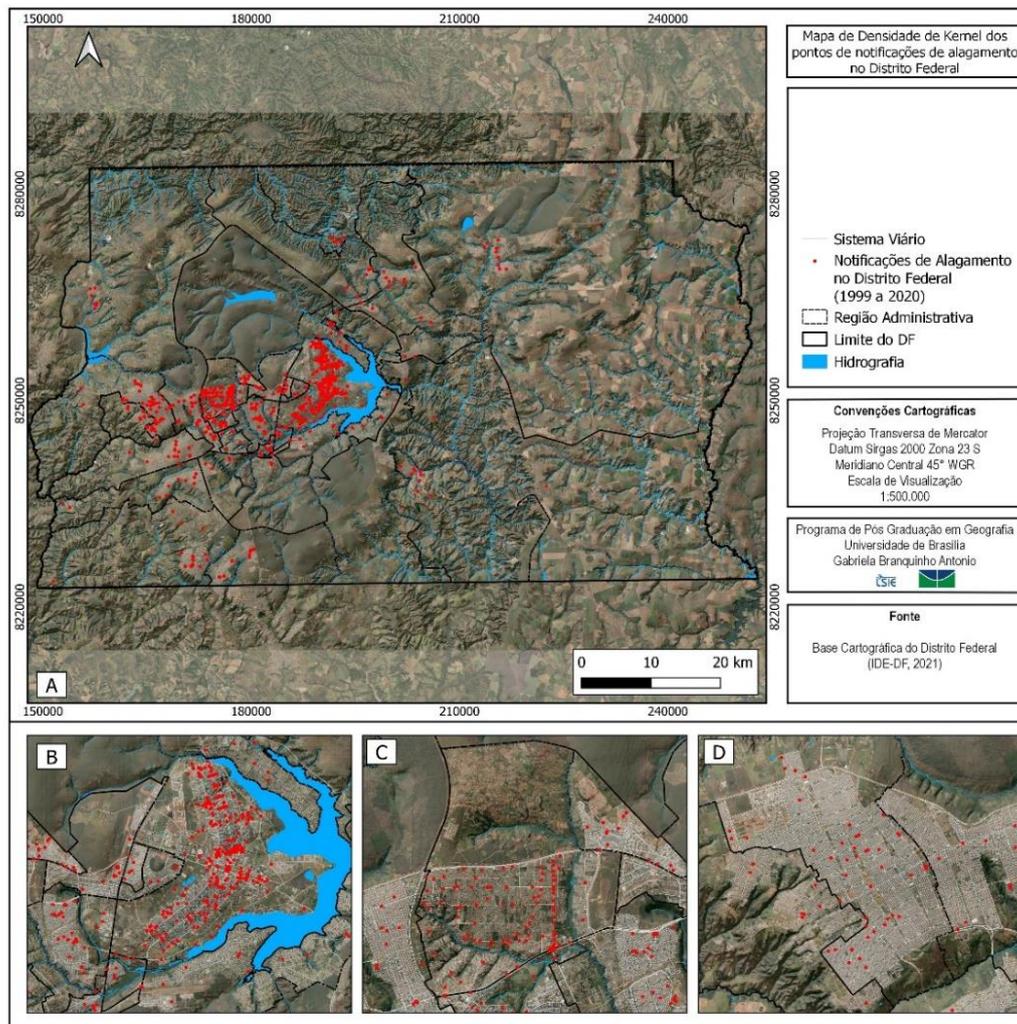


Figura 45 – Distribuição Espacial dos Pontos de Notificações de Alagamento. Figura A: Mapa geral do Distrito Federal; Figura B: Mapa da Região Administrativa do Plano Piloto; Figura C: Mapa da Região Administrativa de Vicente Pires; e, na Figura D: Mapa da Região Administrativa de Ceilândia.

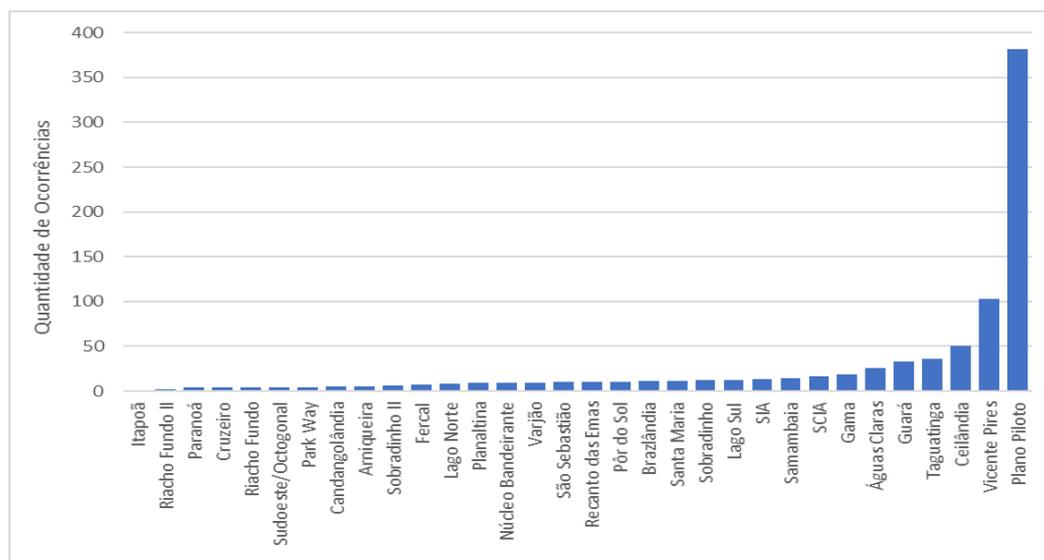


Figura 46 - Distribuição das ocorrências de alagamento por região administrativa

Das 33 regiões administrativas do DF, 18 delas apresentam de 1 a 10 notificações de alagamento, 9 apresentam de 11 a 30 notificações de alagamento, 3 apresentam de 30 a 50 notificações. Cabe destacar que, em Vicente Pires e Plano Piloto, observou-se uma média de 5 e 19 notificações de alagamento ano, respectivamente.

Embora a Região Administrativa de Vicente Pires e a Região Administrativa do Plano Piloto concentrem 56% das notificações de alagamento do todo o DF e 44% restantes estejam distribuídas em 30 Regiões Administrativas. Isto não significa que nestas regiões não ocorram alagamentos em quantidade e/ou intensidade similares as áreas mais notificadas. Isso porque, de acordo com Vanelli et al. (2020) e Santos e Paula (2021), dados documentais como notícias de jornais, podem imprimir além da percepção humana sobre o evento, posicionamentos políticos, ideológicos e econômicos, de forma estratégica, visando atender um determinado público. Santos e Paula (2021), observaram uma tendência de publicação de notícias com valor social e em áreas de maior vulnerabilidade socioambiental, em Fortaleza por exemplo.

Entretanto, no Distrito Federal, o que se observa é uma grande quantidade de notícias sobre os alagamentos e os seus impactos, com enfoque principal nas áreas centrais, que comumente estão associadas a regiões cuja população tende a ter uma renda *per capita* maior e conseqüentemente, locais onde o m² dos imóveis são mais caros e valorizados, como é o caso do Plano Piloto.

Quando analisado a densidade de pontos por área consolidada de cada Região Administrativa, observamos uma densidade de pontos de notificações de alagamento variando entre uma densidade média e uma densidade alta em outras Região Administrativa além de Vicente Pires e Plano Piloto (Figura 47).

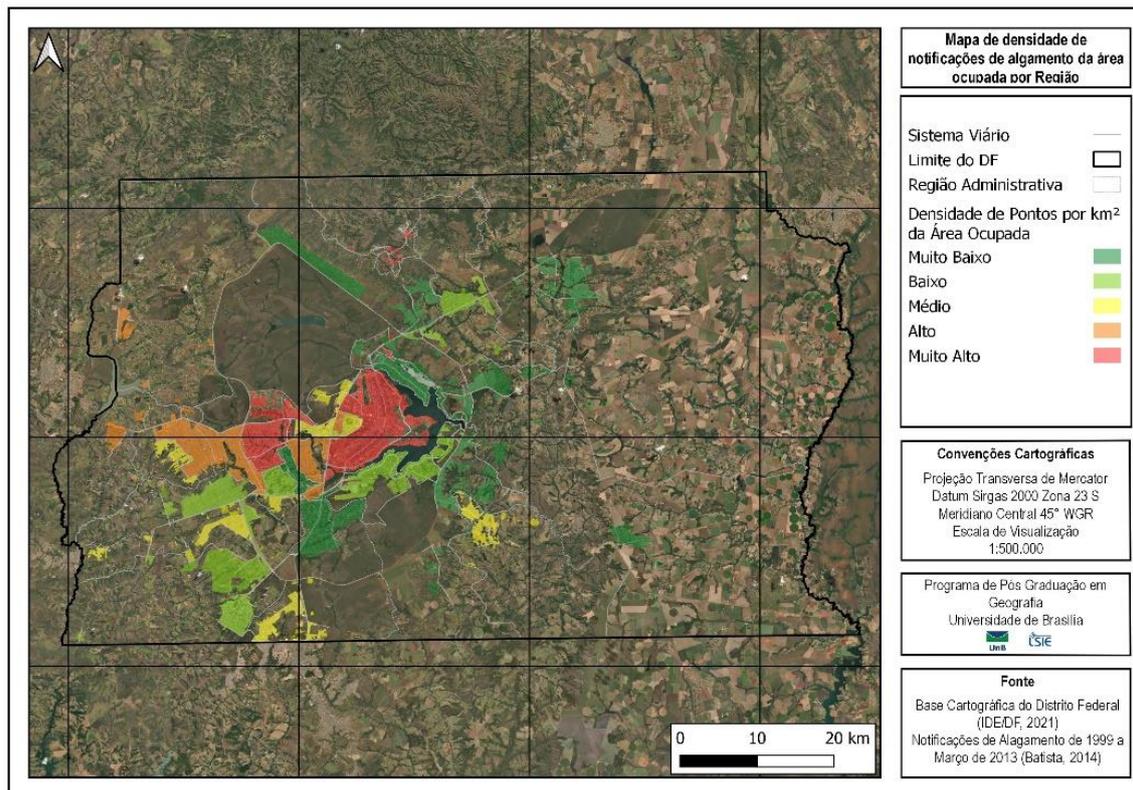


Figura 47 – Mapa de Densidade de pontos de alagamento por Região Administrativa

Das 33 regiões administrativas, 7 apresentam uma densidade de notificações de alagamento muito alta (Águas Claras, Candangolândia, Fercal, Plano Piloto, SCIA, Varjão, Vicente pires), 6 apresentam uma densidade de notificações de alagamento alta (Brazlândia, Ceilândia, Cruzeiro, Guará, Taguatinga e Núcleo Bandeirante), 7 apresentam média densidade de notificações de alagamento (Pôr do Sol, Recanto das Emas, Riacho Fundo, Santa Maria, São Sebastião, SIA, Sudoeste/Octogonal), as demais 13 Regiões administrativas apresentam uma densidade baixa a muito baixa.

No geral, as áreas que apresentam muito alta e alta densidade de pontos por área com ocupação consolidada, possuem um sistema de drenagem não implantado até 2008 ou o sistema encontra-se parcialmente implantado até 2008 e há também locais que o sistema se encontrava em implantação em 2016, de acordo com o PDSB-DF. Algumas áreas com alta densidade de pontos por área com ocupação consolidada, tem o sistema de drenagem totalmente implantado, como é o caso por exemplo do Guará e de Núcleo Bandeirante.

Quando analisado a densidade de pontos por km², observasse alguns *hotspot* locais (Figura 48). De modo que, ocorrem altas densidade de pontos por km² nas Regiões Administrativas Plano Piloto e Vicente Pires.

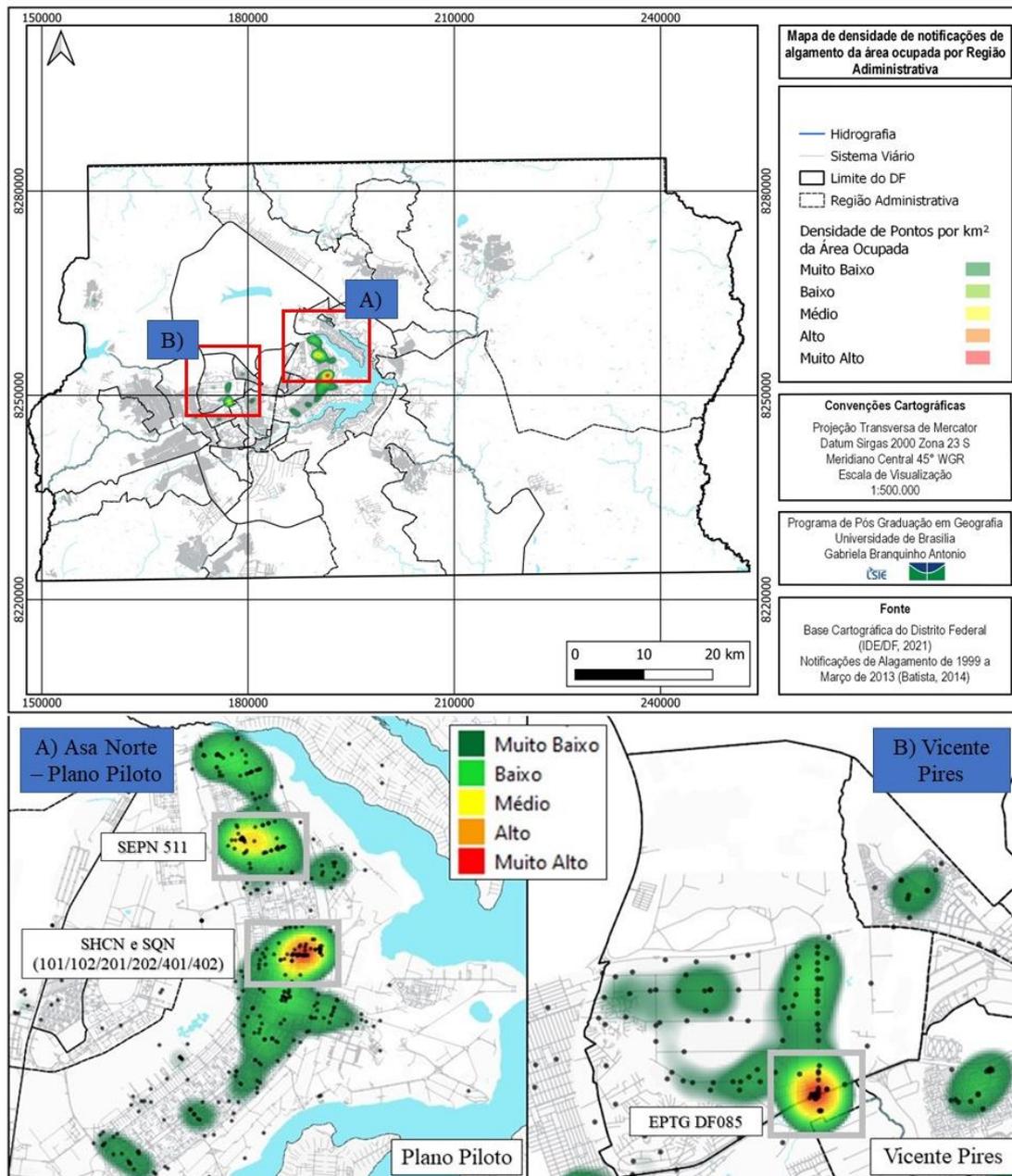


Figura 48 - Mapa de Calor dos pontos de notificações de alagamento do Distrito Federal.

No Plano Piloto, a densidade de pontos é mais expressiva no início e no final da Asa Norte, principalmente devido aos alagamentos que frequentemente ocorrem no Comércio Local Norte (SHCN) e nas Super Quadras Norte - SQN (áreas residenciais), respectivamente nas quadras 101/102/201/202 e nas SQN 401/402, além do Setor de Edifícios Públicos Norte - SEPN 511.

E em Vicente Pires, as áreas que apresentam alta densidade de pontos, ocorrem na Via EPTG DF085 no acesso a Vicente Pires pelo Viaduto Israel Pinheiros e nas ruas

4A/ 4B/ 4C. Já as áreas com baixas concentrações de pontos de notificações de alagamento ocorrem nas ruas 4, 8, 10 e 12.

No Distrito Federal, as áreas onde ocorrem ocupações consolidadas estão essencialmente inseridas em dois contextos de unidades geomorfológicas, de Planaltos Intermediário e Planaltos (na porção central/oeste do DF) (Figura 49). As áreas relativas as unidades geomorfológicas Rebordo e Escarpa, são usualmente pouco ocupadas e as Planícies apresentam um uso predominantemente rural, na porção leste do DF.

Nas unidades geomorfológicas supracitadas, ocorrem de forma predominante os Latossolos (vermelho e/ou vermelho amarelo), os quais são conhecidos por serem solos muito profundos. De acordo com Sartori (2001), apresentam grande potencial de infiltração quando não estão compactados ou impermeabilizados, estando esses solos categorizados no Grupo de Solos Hidrológicos A (mais permeável). Dessa forma, a impermeabilização desse tipo de solo promove uma redução na infiltração e consequentemente um incremento no escoamento superficial.

Nas unidades geomorfológicas de Planaltos Intermediários e Planaltos, ocorrem, respectivamente 545 notificações e 257 notificações, totalizando aproximadamente 94% das notificações de alagamentos do cadastro (Figura 49).

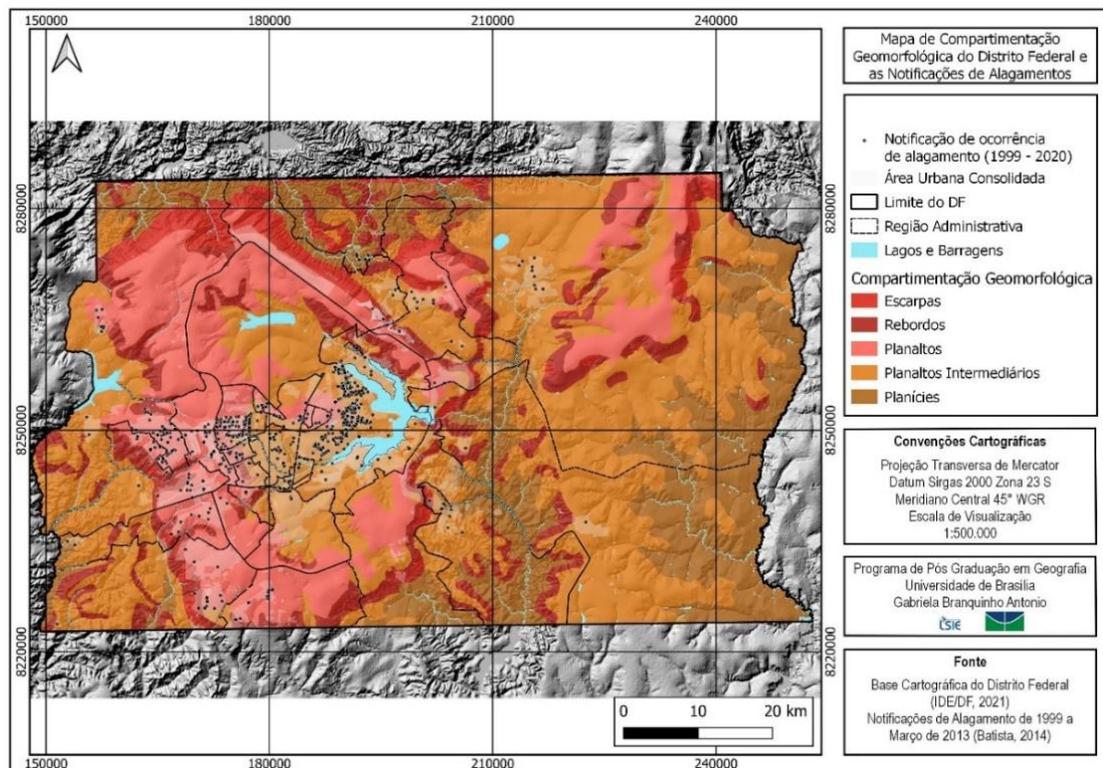


Figura 49 - Mapa das notificações de alagamento em relação à compartimentação geomorfológica do Distrito Federal.

A quantidade de notificações de alagamento na unidade geomorfológica dos Planaltos Intermediários pode ter associação com a topografia mais suave, o que favorece o processo de ocupação.

Quando analisado a relação das notificações de alagamento com o uso e cobertura do solo, observamos que aproximadamente 75% das notificações de alagamentos do cadastro ocorrem no sistema viário (Figura 50), principalmente em vias importantes que possuem grande fluxo de veículos particulares e públicos. Podemos verificar isso, nas vias W3 Norte e L2 Norte no Plano Piloto, as vias de circulação locais em Vicente Pires e a Via Alagados em Santa Maria, impactando a mobilidade da população dentro da cidade e conseqüentemente ao acesso aos equipamentos públicos urbanos (Figura 50 A e B).

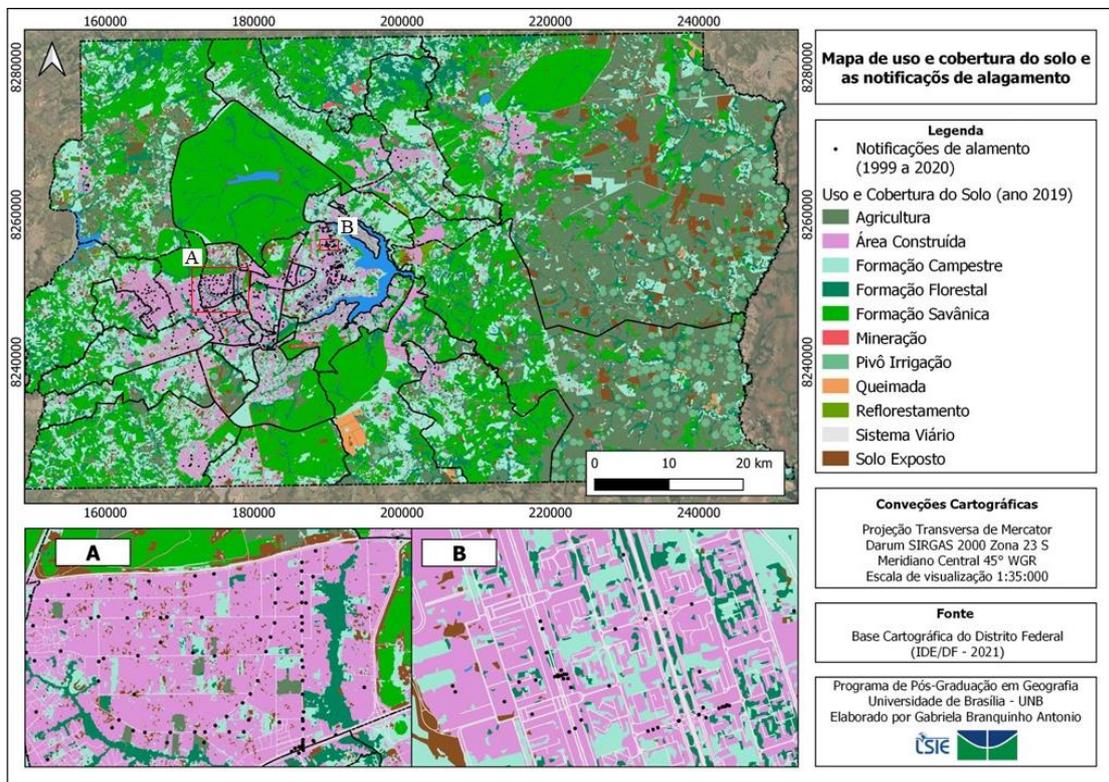


Figura 50 – Mapa de uso e cobertura do solo e as notificações de alagamento; planta chave A, apresentando um trecho da Região Administrativa de Vicente Pires; e, a planta chave B, apresentando um trecho da Região Administrativa do Plano Piloto na Asa Norte.

Considerando o exposto acima, foi analisado a distância euclidiana dos pontos de notificações de alagamento em relação a diversos equipamentos públicos, utilizando intervalos de faixa de distância de 500 m (Figura 51).

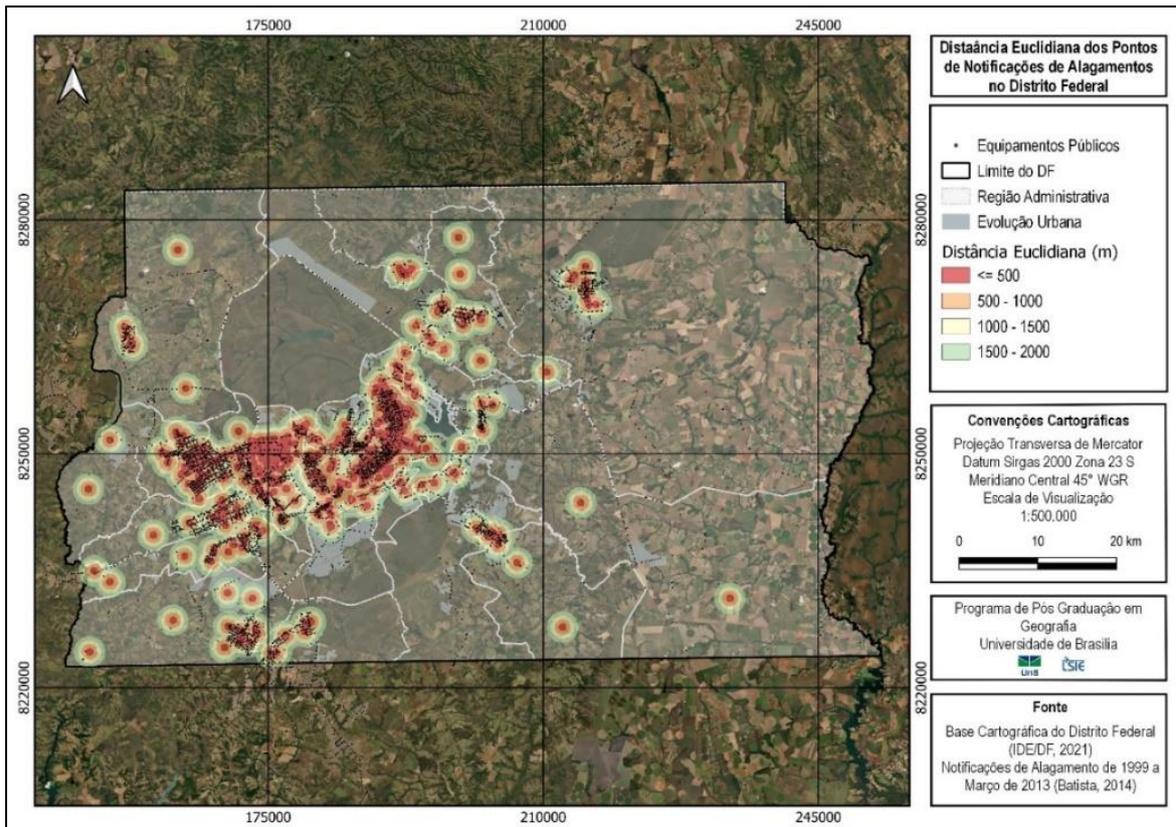


Figura 51 – Mapa com a distância euclidiana (m) a partir dos pontos de alagamento, para o Distrito Federal.

Na Tabela 10, são elencadas as porcentagens dos equipamentos públicos por faixa da distância euclidiana apresentada no mapa acima e a quantidade e a categoria de equipamentos públicos inseridos nas faixas.

Tabela 10 - Porcentagem de equipamento público por faixa de distância euclidiana, utilizando os pontos de alagamento como ponto de partida.

| Distância euclidiana (m) | Escola (%) | Saúde (%) | Mobiliário de lazer (%) | Segurança (%) | Metrô (%) | Parada de ônibus (%) |
|-------------------------------------|-------------|------------|-------------------------|---------------|-----------|----------------------|
| 0 - 500 | 47.91 | 49.62 | 49.72 | 49.53 | 79.31 | 34.70 |
| 500 - 1000 | 30.60 | 22.14 | 34.54 | 32.29 | 13.79 | 22.49 |
| 1000 - 1500 | 9.20 | 11.45 | 9.48 | 11.29 | 6.90 | 12.45 |
| 1500 - 2000 | 3.93 | 6.11 | 3.13 | 2.51 | 0.00 | 6.05 |
| 2000 - 2500 | 1.00 | 1.53 | 1.34 | 1.57 | 0.00 | 4.31 |
| > 2500 | 7.36 | 9.16 | 1.67 | 2.82 | 0.00 | 19.99 |
| Nº total de equipamentos existentes | 1196 | 131 | 2458 | 319 | 29 | 5452 |

Observa-se que a maior parte dos equipamentos públicos está inserida no raio inicial de até 500 m de um ponto de notificação de alagamento. Dependendo da extensão da área alagada e da altura da lâmina de água, esses equipamentos podem ser atingidos, como é o caso de algumas escolas, estacionamentos ou vias de acesso aos hospitais ou

unidades básicas de saúde, dificultando o deslocamento e, conseqüentemente, o acesso aos serviços, especialmente em situações de emergência (Figura 52).

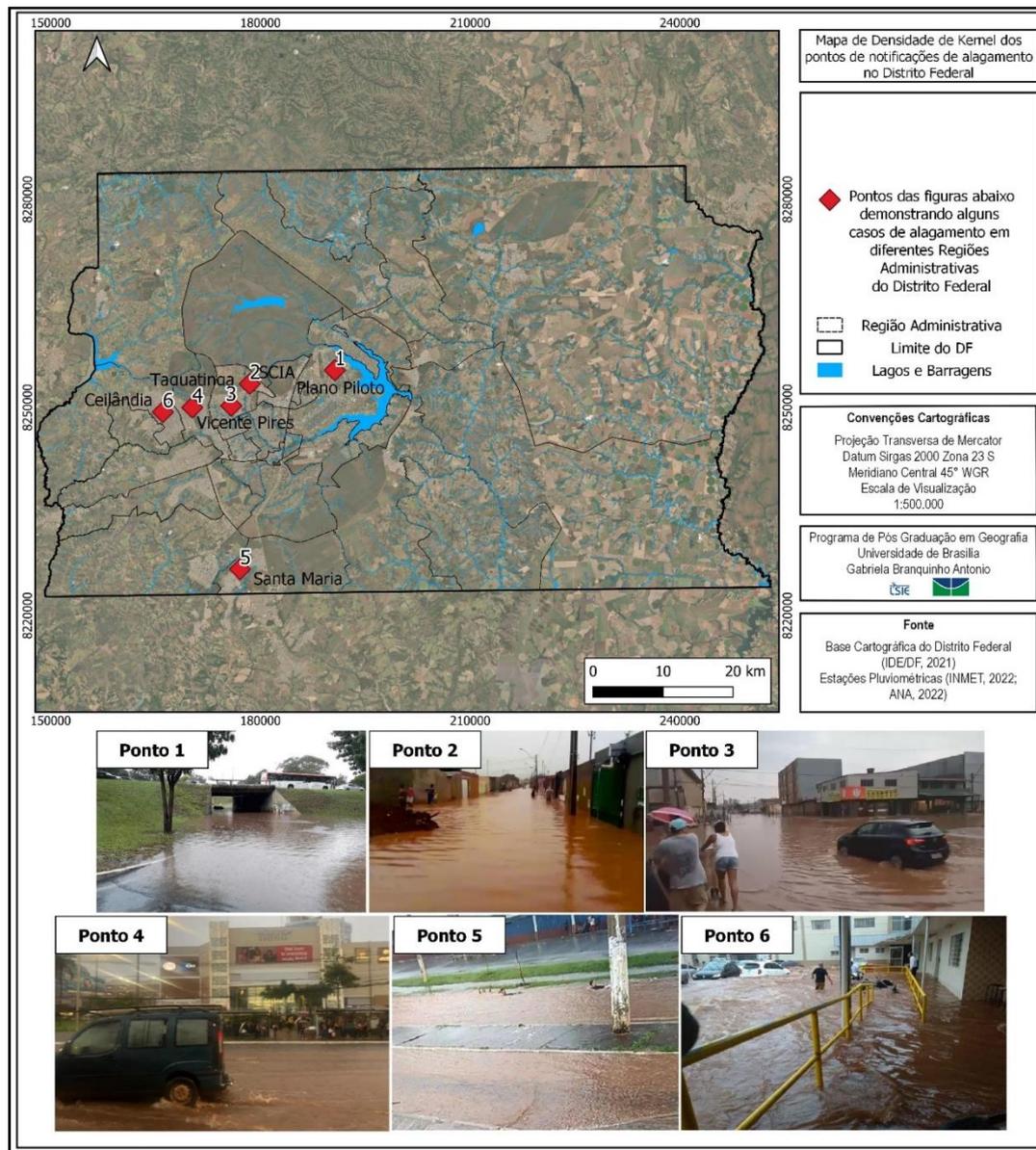


Figura 52 – Exemplos de Pontos de Notificações de Alagamentos próximo a hospitais e centros de saúde. Ponto 1 – Tesourinha da 209, Asa Norte – Plano Piloto; Ponto 2 – Pôr do Sol/Sol Nascente; Ponto 3 – Vicente Pires; Ponto 4 – Taguatinga; Ponto 5 - Avenida Alagados (Santa Maria); Ponto 6 - Hospital Regional de Ceilândia.

Fonte: Portal G1 Notícias e Correio Brasiliense.

Considerando a relevância que o sistema de drenagem pluvial tem para o tema, foi gerado um mapa de distância euclidiana a partir das bocas de lobo visando quantificar as notificações de alagamentos que ocorrem por faixa de distância das bocas de lobo (Figura 53).

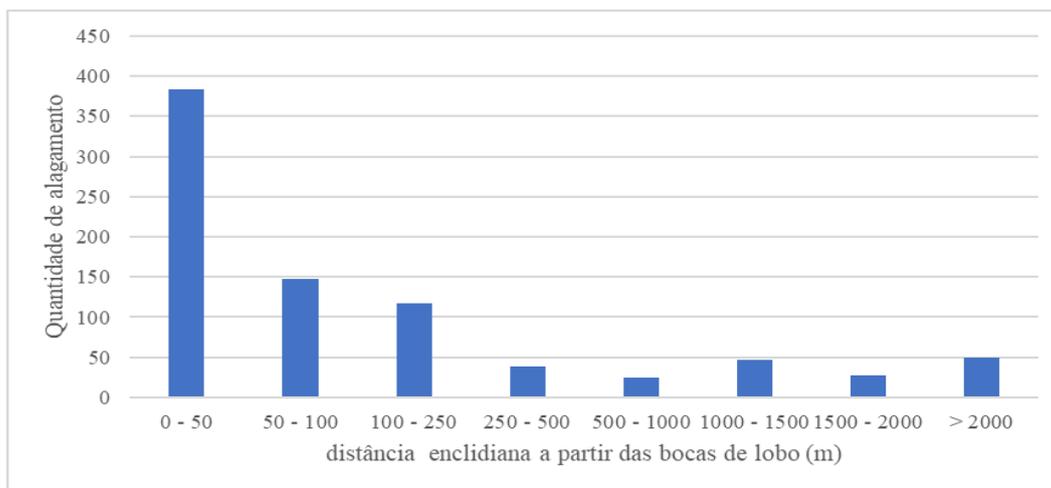


Figura 53 – Gráfico de dos alagamentos pela distância euclidiana das bocas de lobo do DF.

Foi observado que 45% das notificações de alagamentos estão inseridas nos primeiros 50 metros de distância e 17% na faixa de 50 a 100 metros, 14% na faixa de 250 – 500. E 22% dos pontos de alagamento ocorrem distribuídos em faixas maiores que 500 metros.

A proximidade e quantidade de notificações em relação as bocas de lobo, pode representar problemas na rede como a não absorção do escoamento em virtude do volume e da velocidade, como também problemas estruturais da boca de lobo, inviabilizando o seu funcionamento adequado.

4.1.1. NOTIFICAÇÕES DE ALAGAMENTO E A PRECIPITAÇÃO

Considerando o exposto acima, observou-se a ocorrência em dois anos que apresentaram um aumento de notificações de alagamentos em relação aos demais anos, que foram 2014 e 2018. Embora o objetivo do trabalho não seja aprofundar-se nas questões de pluviosidade, pois a ocorrência de alagamentos depende de outros fatores que podem ter um impacto maior, procurou-se de forma simplificada verificar se existe uma relação entre a precipitação e a quantidade de notificações de alagamento.

Na Figura 54, observamos que os anos de 2005, 2008, 2013, 2014, 2018 e 2020 apresentaram uma precipitação média anual acumulada superior à média de precipitação que usualmente ocorre em Brasília.

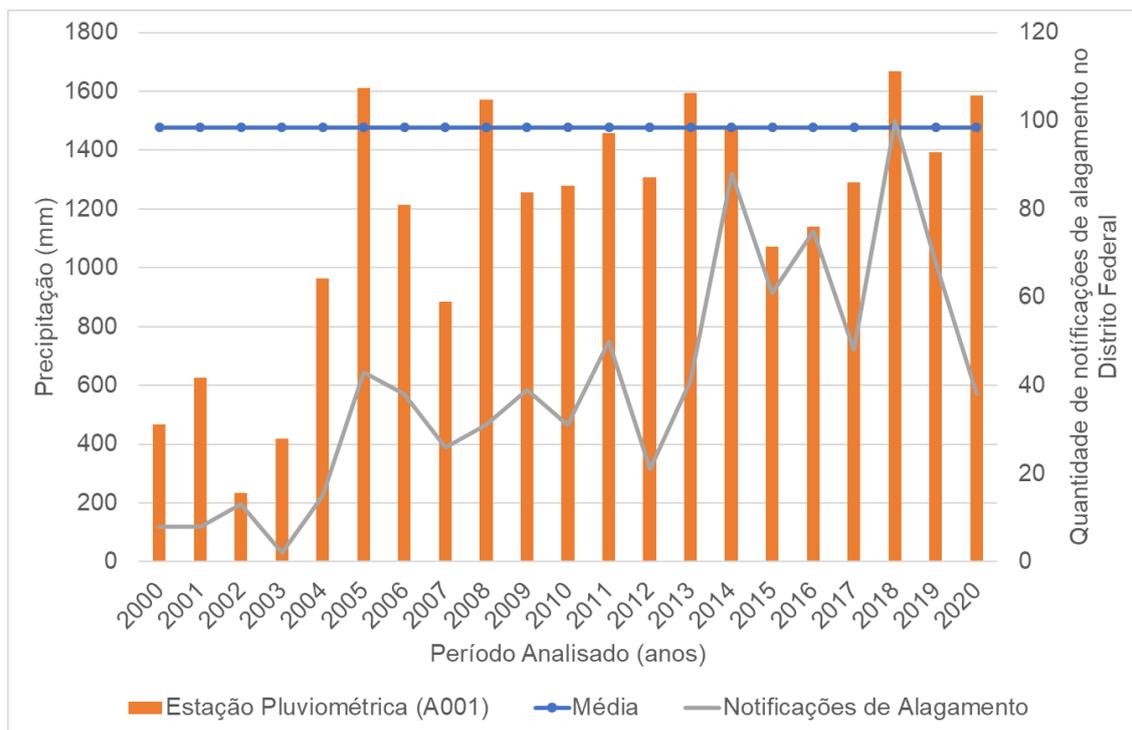


Figura 54 - Relação entre a precipitação média anual acumulada da estação pluviométrica A001 e as notificações de alagamento. Linha azul da média, é a precipitação média anual que ocorre no Distrito Federal (1477mm).

Observa-se, dessa forma, que os anos de 2014 e 2018, os quais apresentaram um incremento de notificações de alagamentos, também apresentam uma média anual acumulada maior que a média usual de Brasília. No entanto, verifica-se que em 2014 apesar de ser o segundo ano com o maior número de notificações, tal ano não é o segundo ano de maior pluviosidade. Deste modo, somente essa análise não é o bastante para determinar uma relação de causalidade. Sendo necessário avaliar por ano e por região administrativa.

De maneira geral, as notificações de alagamento, estão distribuídas ao longo de 263 datas de eventos de precipitação, de modo que, para cada data cadastrada, foram registradas, em média, até 3 notificações de alagamento associados.

E cada evento de precipitação tem, em média, o potencial de desencadear pontos de alagamento em até duas Regiões Administrativas. São exemplos: o evento chuvoso que ocorreu no dia 24/02/2020, o qual provocou notificações de alagamento em cinco Regiões Administrativas, onde, de acordo com a notícia, a quantidade de chuva superou a média mensal esperada para o mês de fevereiro.

E o evento chuvoso que aconteceu no dia 21/04/2019, em que um único episódio de precipitação resultou em 19 pontos distintos de notificações de alagamento, todos na mesma Região Administrativa, representando 76% das notificações de alagamentos registradas no mês de abril (25) daquele ano.

Conforme o esperado, as notificações de alagamento ocorrem somente durante o período chuvoso, que se inicia entre setembro e outubro e se encerra entre abril e maio (Figura 55).

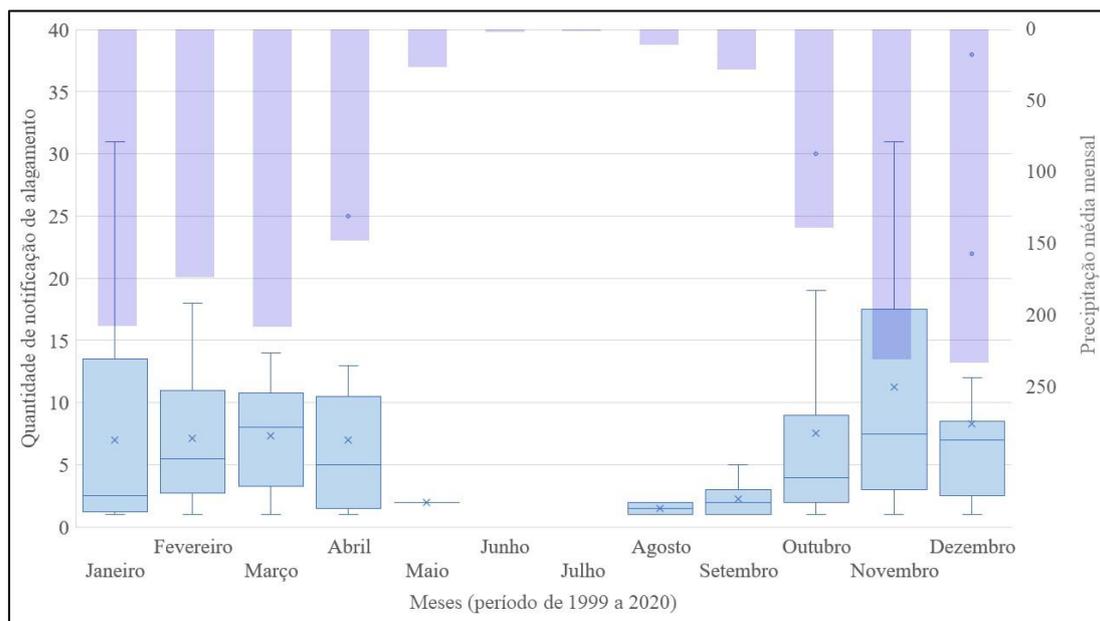


Figura 55 - Gráfico de BloxPot dos alagamentos ao longo dos meses do cadastro de notificações de alagamento para o Distrito Federal e precipitação média acumulada mensal. Período de 2000 a 2020. Estação pluviométrica considerada: A001 do INMET, período de 2000 a 2020.

Contudo, observa-se que os meses de outubro, dezembro e abril apresentam uma quantidade maior *outliers* em relação aos demais meses, indicando que nos meses supracitados ocorre em alguns anos uma quantidade atípica de notificações de alagamentos.

Com relação ao mês de dezembro, os anos que apresentam as maiores quantidades de notificações de alagamento foram, 2005 (22 notificações) e 2014 (38 notificações), sendo esses anos, os que apresentam uma maior precipitação média acumulada no mês de dezembro, com respectivamente 390,4 mm e 328,6 mm, ultrapassando mais de 100 mm da média acumulada mensal para o mês (233 mm). E os meses de novembro e janeiro, apresentam uma média de notificações de alagamentos maior que o restante dos meses do período chuvoso.

4.1.2. DADOS CIDADÃOS COMO UMA FONTE DE DADOS PARA CONHECER OS IMPACTOS DOS ALAGAMENTOS

Os alagamentos, são eventos rápidos e concentrados, podendo ter uma frequência de ocorrência alta durante o período de chuva. Apesar de não apresentarem a mesma magnitude de uma inundação, podem deflagrar diversos impactos negativos para a cidade.

Durante a coleta dos dados, quando informado, foi cadastrado informações sobre a localização do alagamento (se ocorreu no sistema viário, no estacionamento em superfície ou no subsolo etc.) e os danos deflagrados.

Os alagamentos ocorrem predominantemente no sistema viário, seja nas vias estruturantes ou nas ruas internas de menor circulação de veículos (Figura 49). Embora as alturas de lâminas de água no sistema viário, mais frequentes sejam semelhantes a altura do meio fio, os locais em que ocorrem alturas de lâminas de água maiores (chegando por exemplo a cobrir metade da porta de um veículo popular, o que equivale a aproximadamente 0,33 e 0,38 metros), podem expor a população a uma alta vulnerabilidade, além de inviabilizar a mobilidade dentro da cidade.

Deste modo, verificou-se que os alagamentos ocorreram predominantemente no sistema viário, sendo que os danos mais frequentemente relatados no cadastro foram de "Carro Danificado". Na Figura 56, é apresentado dois gráficos com a porcentagem dos locais mais afetados e a esquerda, os danos mais notificados.

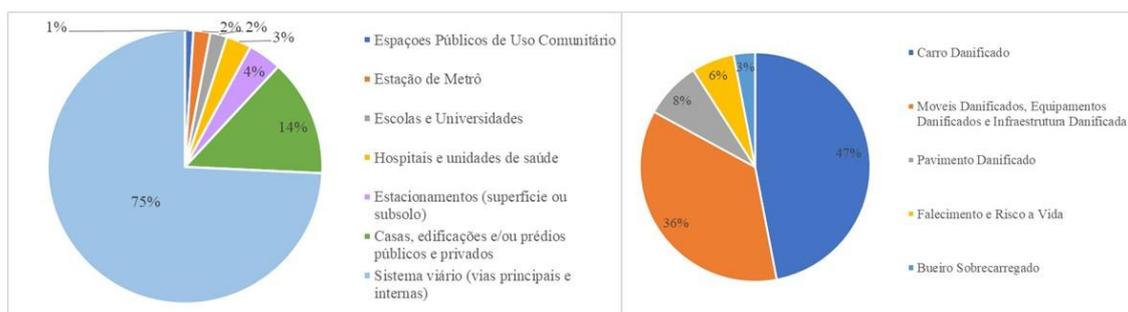


Figura 56 – Esquerda: relação dos locais mais afetados do Distrito Federal, com base no cadastro de alagamento; Direita: relação dos danos mais notificados no Distrito Federal, com base no cadastro de alagamento

A classe de moveis danificados ocorrem principalmente associado a degradação de prédios institucionais, como a UNB (Figura 57), hospitais e escolas, e de forma mais

discreta associada a casos que ocorrem quando há o incremento do escoamento superficial ao ponto de atingir as áreas internas das residências.



Figura 57 – Prejuízos materiais causados pela precipitação que ocorreu no dia 22/04/2019 no Instituto Central de Ciências da Universidade de Brasília, Campos Darcy Ribeiro, localizado na Asa Norte – Plano Piloto.

4.2. ANÁLISE DOS DADOS DO GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT - GPM

4.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A QUALIDADE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DE MEDIÇÃO EM SOLO E DO GPM

Considerando o período inicial definido para a análise (2014 a 2019) entre as estações pluviométricas e o GPM, das 23 estações pluviométricas telemétricas inseridas no Sistema HIDRO - Telemetria do SNIRH, apenas 9 apresentaram uma série contínua de dados por pelo menos 5 anos nesse período. Das 5 estações pluviométricas geridas pelo INMET, apenas três possuem dados disponíveis para o período estabelecido.

Na Tabela 11 é apresentada a relação de quantidade de registros que cada estação pluviométrica e o GPM deveriam ter em um ano e em cinco anos.

Tabela 11 - Quantidade de registros em relação a escala temporal de medição das estações pluviométricas e do GPM

| Origem | Escala Temporal (minutos) | Registro ao ano (365 dias) | Registro para a série histórica (1825 dias) |
|---------------|---------------------------|----------------------------|---|
| Sistema HIDRO | 15 | 35.040 | 175.200 |
| INMET | 60 | 8.760 | 43.800 |
| GPM | 30 | 17.520 | 87.600 |

Embora tenha sido realizado essa triagem inicial, não foi possível encontrar estações pluviométricas totalmente sem falha nos dados disponibilizados pela ANA, cinco estações apresentam taxa de falha maiores que 70 % e 2 estações apresentam falha entre 20% e 30%. E nas estações automáticas do INMET a estação A046 apresenta falhas acima de 70% para o ano de 2014.

Como pode ser observado na Tabela 12, considerando os dados das estações pluviométricas do Sistema HIDRO, de maneira geral, entre 83 a 66% das estações pluviométricas apresentam anos com falhas menores que 5%. Os dias com falha foram removidos, não sendo utilizados nas análises.

Tabela 12 – Relação de falhas nas séries hidrológicas de precipitação

| Código | Estações | | Porcentagem de Falha Anual | | | | | |
|---------|-------------|---------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | Tipo | Fonte | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| 1547079 | Telemétrica | Sistema HIDRO | 7,6 | 2,9 | 2,9 | 4,8 | 1,3 | 4,3 |
| 1547040 | | | 88,3 | 3,5 | 3,5 | 1,3 | 0,5 | 1,6 |
| 1547082 | | | 30,0 | 1,6 | 2,4 | 3,4 | 3,3 | 13,1 |
| 1547091 | | | 79,7 | 1,4 | 0,9 | 3,0 | 0,6 | 1,7 |
| 1548054 | | | 87,9 | 1,1 | 0,8 | 1,2 | 1,4 | 0,1 |

| Código | Estações | | Porcentagem de Falha Anual | | | | | |
|---------|------------|-------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | Tipo | Fonte | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| 1647009 | | | 87,2 | 1,6 | 1,1 | 0,4 | 8,6 | 0,2 |
| A001 | Automática | INMET | 0,00 | 1,0 | 0,00 | 0,00 | 1,0 | 0,00 |
| A045 | | | 0,02 | 2,64 | 2,30 | 3,18 | 0,94 | 0,57 |
| A046 | | | 78,45 | 1,11 | 3,53 | 3,74 | 2,50 | 0,01 |

4.2.2. ANÁLISE DO GRID GPM X ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM SOLO

A análise foi realizada considerando os seguintes cenários: a) considerando o ano completo (Período de chuva e seco); b) o período de chuva (setembro a abril); c) somente os dias com precipitação (estação pluviométrica e GPM); d) somente os dias que houve precipitação no GPM; e e) somente os dias que houve precipitação na estação pluviométrica em solo. Foram adotadas as seguintes escalas temporais, Anual, Trimestral, Mensal, Diário, Acumulado de 3 horas e Horário.

A Tabela 13 mostra os coeficientes de Correlação de Pearson (CP) entre a precipitação estimada pelo GPM em relação a medida pelas estações pluviométricas em solo, para os cenários supracitados. Os valores de CP foram classificados de acordo com Teodoro et al. (2020) apud Giwlewski e Nawalany (2018).

Tabela 13 - Correlação entre os valores de precipitação medidos pelas estações pluviométricas e o GRID do GPM.

| Cenário a) Todos os dados do GPM e todos os dados da estação | | | | | | | | |
|--|------|---------|--------|---------|---------|---------|------|---------|
| Escala Temporal | A045 | 1547091 | 157040 | 1548055 | 1547097 | 1547079 | A046 | 1647009 |
| Anual | 0,06 | 0,93 | 0,48 | 0,98 | 0,84 | 0,61 | 0,89 | 0,99 |
| Trimestral | 0,95 | 0,87 | 0,81 | 0,97 | 0,97 | 0,92 | 0,96 | 0,92 |
| Mensal | 0,92 | 0,84 | 0,70 | 0,89 | 0,95 | 0,89 | 0,90 | 0,87 |
| Diário | 0,58 | 0,45 | 0,40 | 0,47 | 0,59 | 0,41 | 0,62 | 0,55 |
| 3 horas | 0,44 | 0,20 | 0,16 | 0,22 | 0,44 | 0,23 | 0,50 | 0,23 |
| Horário | 0,35 | 0,08 | 0,05 | 0,07 | 0,30 | 0,12 | 0,34 | 0,09 |
| Cenário b) Todos os dados do GPM e todos os dados da estação (Período chuvoso) | | | | | | | | |
| Escala Temporal | A045 | 1547091 | 157040 | 1548055 | 1547097 | 1547079 | A046 | 1647009 |
| Anual | 0,33 | 0,90 | 0,43 | 0,97 | 0,87 | 0,63 | 0,92 | 0,99 |
| Trimestral | 0,93 | 0,82 | 0,76 | 0,96 | 0,96 | 0,89 | 0,95 | 0,89 |
| Mensal | 0,87 | 0,74 | 0,46 | 0,70 | 0,89 | 0,74 | 0,78 | 0,74 |
| Diário | 0,56 | 0,40 | 0,36 | 0,41 | 0,54 | 0,37 | 0,61 | 0,51 |
| 3 horas | 0,44 | 0,19 | 0,14 | 0,13 | 0,43 | 0,22 | 0,49 | 0,22 |

| | | | | | | | | |
|--|-------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| Horário | 0,32 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,30 | 0,12 | 0,34 | 0,08 |
| Cenário c) Todos os dados com chuva sejam do GPM ou da estação | | | | | | | | |
| Escala Temporal | A045 | 1547091 | 157040 | 1548055 | 1547097 | 1547079 | A046 | 1647009 |
| Anual | 0,35 | 0,79 | 0,85 | 0,95 | 0,72 | 0,79 | 0,87 | 0,96 |
| Trimestral | 0,94 | 0,85 | 0,92 | 0,96 | 0,96 | 0,89 | 0,97 | 0,96 |
| Mensal | 0,88 | 0,79 | 0,73 | 0,87 | 0,92 | 0,71 | 0,88 | 0,89 |
| Diário | 0,54 | 0,39 | 0,37 | 0,49 | 0,52 | 0,32 | 0,59 | 0,55 |
| 3 horas | 0,31 | 0,09 | 0,06 | 0,08 | 0,34 | 0,08 | 0,41 | 0,02 |
| Horário | 0,23 | -0,04 | 0,00 | -0,01 | 0,22 | -0,01 | 0,28 | -0,03 |
| Cenário d) Todos os dados do GPM com chuva e todos os dados da estação relacionados | | | | | | | | |
| Escala Temporal | A045 | 1547091 | 157040 | 1548055 | 1547097 | 1547079 | A046 | 1647009 |
| Anual | 0,42 | 0,91 | 0,82 | 0,94 | 0,88 | 0,57 | 0,92 | 0,97 |
| Trimestral | 0,95 | 0,95 | 0,89 | 0,94 | 0,98 | 0,87 | 0,97 | 0,92 |
| Mensal | 0,89 | 0,82 | 0,72 | 0,84 | 0,96 | 0,79 | 0,89 | 0,87 |
| Diário | 0,53 | 0,42 | 0,40 | 0,51 | 0,59 | 0,38 | 0,63 | 0,55 |
| 3 horas | 0,41 | 0,21 | 0,19 | 0,22 | 0,44 | 0,26 | 0,49 | 0,18 |
| Horário | 0,25 | 0,04 | 0,03 | 0,10 | 0,31 | 0,10 | 0,36 | 0,05 |
| Cenário e) Todos os dados de estação com chuva e todos os dados da GPM relacionados | | | | | | | | |
| Escala Temporal | A045 | 1547091 | 157040 | 1548055 | 1547097 | 1547079 | A046 | 1647009 |
| Anual | 0,05 | 0,91 | 0,82 | 0,95 | 0,78 | 0,85 | 0,84 | 0,93 |
| Trimestral | 0,95 | 0,83 | 0,89 | 0,97 | 0,95 | 0,92 | 0,96 | 0,94 |
| Mensal | 0,91 | 0,80 | 0,80 | 0,84 | 0,93 | 0,77 | 0,90 | 0,87 |
| Diário | 0,55 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,53 | 0,31 | 0,60 | 0,54 |
| 3 horas | 0,35 | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,37 | 0,09 | 0,31 | 0,12 |
| Horário | 0,27 | -0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,24 | 0,01 | 0,31 | 0,00 |

*CP \geq 0,85 são correlações muito boas; entre 0,7 e 0,85 são correlações boas; entre 0,6 e 0,7 são correlações satisfatórias; entre 0,4 e 0,6 são correlações aceitáveis; e menores que 0,4 são correlações insatisfatórias.

Como é possível observar na Tabela 14, o *Cenário A* (período chuvoso e de seca), são observadas melhores correlações, entre mais grids e estações pluviométricas, inseridos na faixa de correlações aceitáveis (CP entre 0,4 – 0,6) para a escala diária, do que os demais cenários. Os cenários C e E, apresentam melhores relações nas escalas mensais, trimestrais e anuais do que os demais cenários.

Tabela 14 – Tabela com a média dos valores dos cenários.

| Cenário a) Todos os dados do GPM e todos os dados da estação | | | | | |
|--|-------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Anual | Trimestral | Mensal | Diário | 3 horas | Horário |
| 0,72 | 0,92 | 0,87 | 0,51 | 0,30 | 0,18 |
| Cenário b) Todos os dados do GPM e todos os dados da estação (Período chuvoso) | | | | | |
| Anual | Trimestral | Mensal | Diário | 3 horas | Horário |
| 0,76 | 0,90 | 0,74 | 0,47 | 0,28 | 0,17 |
| Cenário c) Todos os dados com chuva sejam do GPM ou da estação | | | | | |
| Anual | Trimestral | Mensal | Diário | 3 horas | Horário |
| 0,79 | 0,93 | 0,83 | 0,47 | 0,17 | 0,08 |
| Cenário d) Todos os dados do GPM com chuva e todos os dados da estação relacionados | | | | | |
| Anual | Trimestral | Mensal | Diário | 3 horas | Horário |
| 0,80 | 0,93 | 0,85 | 0,50 | 0,30 | 0,16 |
| Cenário e) Todos os dados de estação com chuva e todos os dados da GPM relacionados | | | | | |
| Anual | Trimestral | Mensal | Diário | 3 horas | Horário |
| 0,77 | 0,93 | 0,85 | 0,47 | 0,20 | 0,11 |

Embora alguns cenários apresentem relações melhores em determinadas escalas temporais, não foi observado mudanças significativas entre as diferentes abordagens que justifiquem a adoção de uma forma específica de separação dos dados.

A resolução espacial dos dados é um fator que deve ser considerado na análise, isso porque, a estação pluviométrica é uma medição local em um ponto e o GPM realiza uma estimativa de uma área de 100 km² (10km x 10km).

De acordo com Jiang e Bauer-Gottwein (2019), a diferença na escala dos dados pode gerar impacto nas correlações, principalmente quando a área de abrangência do GPM tem características heterogenias em termos de uso e cobertura e relevo e é caracterizada por um padrão de chuvas heterogêneo, como é caso de várias regiões do DF.

Além disso, a baixa disponibilidade de estações pluviométricas em relação a área de cobertura do GPM pode ser insuficiente para que seja realizada avaliação adequada da real capacidade de previsão do GPM (MOHAMMED et. al., 2020).

Observa-se que o GPM consegue representar adequadamente a variabilidade das precipitações medidas em solo, ainda que, seja observado uma tendencia do GPM em superestimar os dados das estações pluviométricas em solo (Figura 58).

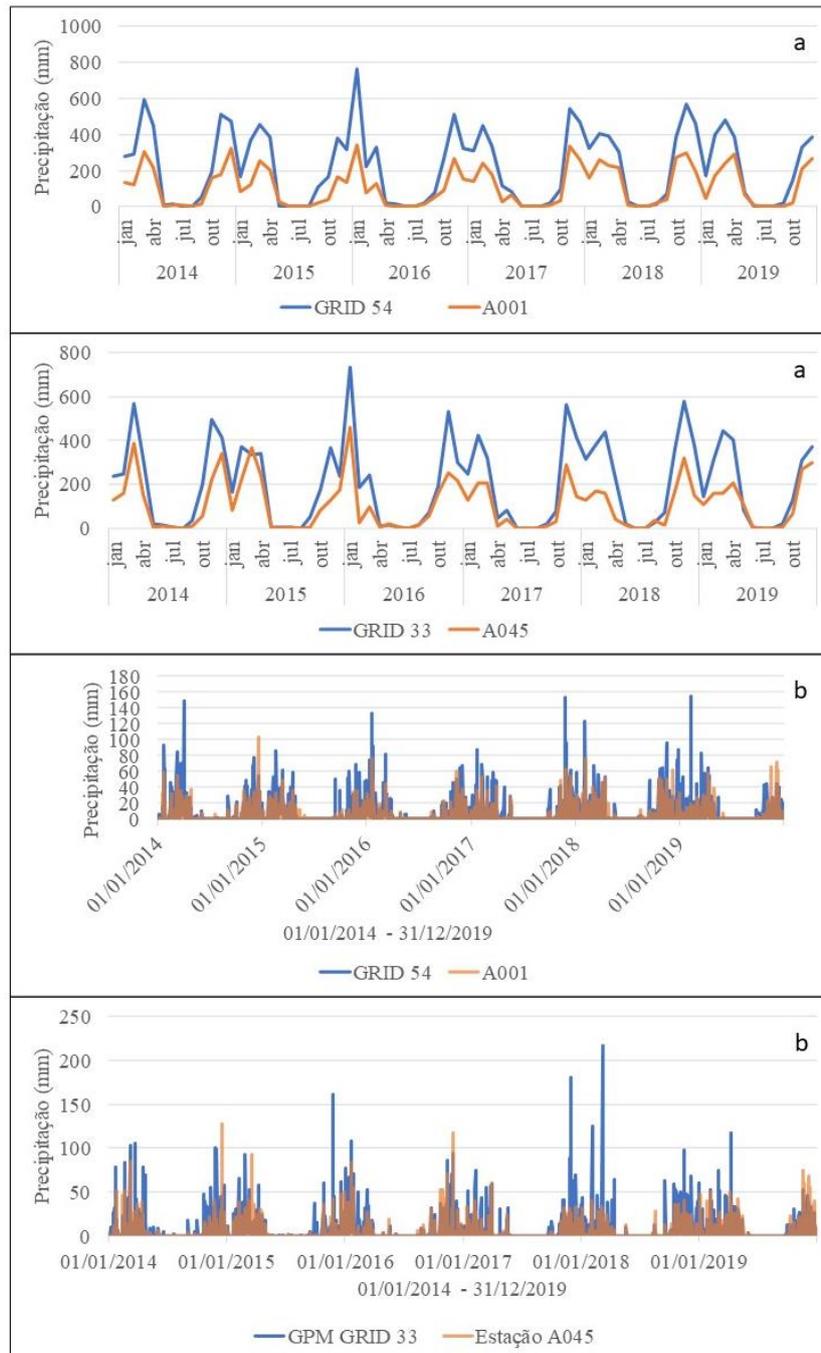


Figura 58 - Hietogramas de precipitação para o período de 2014 a 2019: a) mensal; e b) diário.

Todavia, na escala horária observar-se duas situações, a primeira é a estação pluviométrica superestima a precipitação estimada pelo GPM e a segunda é, o GPM captura frequentemente precipitações, mesmo que de baixa intensidade, que não atingem a estação pluviométrica, o que explicaria a superestimação do GPM quando observado em escalas temporais menos refinadas (acumulados diários até os anuais).

Os dados de precipitação do GPM e da estação pluviométrica apresentam um bom ajuste, de maneira geral, nas escalas temporais mensais, trimestrais e anuais com coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,6. Nas escalas diária, acumulado de 3 horas e horária o coeficiente de determinação (R^2) é baixo, não ultrapassando 0,25 (Figura 59).

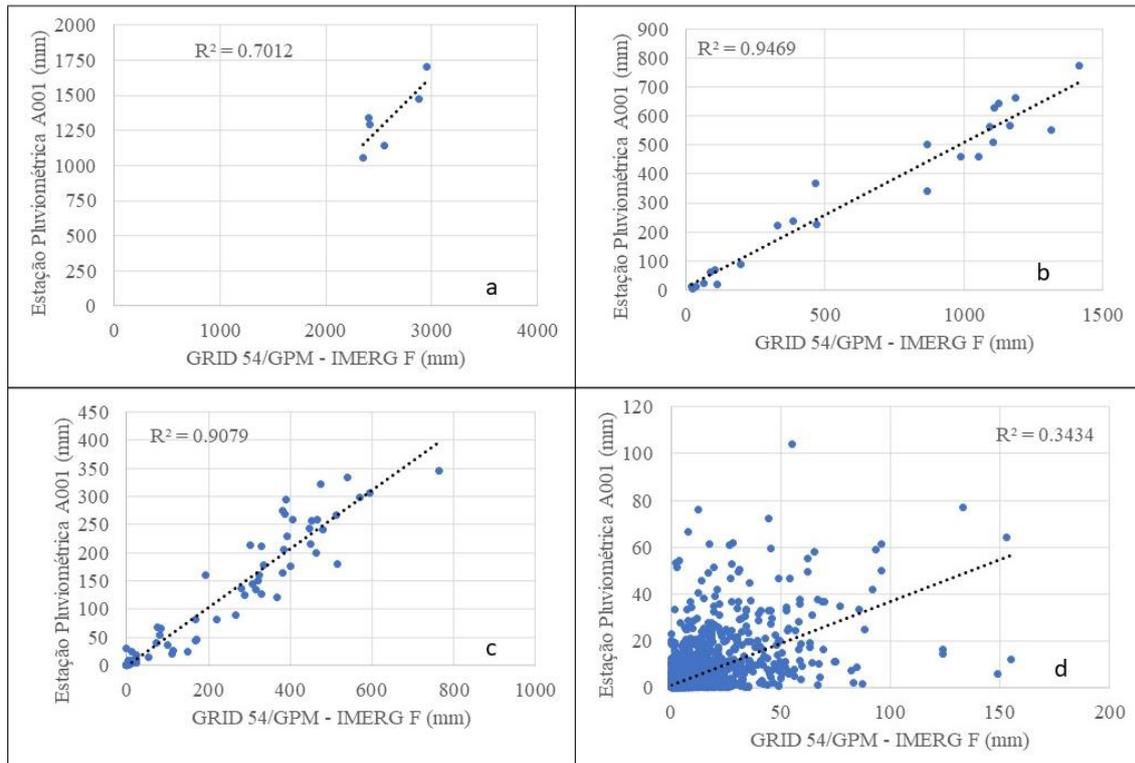


Figura 59 – Gráficos de dispersão entre a estação pluviométrica A001 e o Grid (pixel) correspondente do GPM: Figura a) escala anual; Figura b) escala trimestral; Figura c) escala mensal; e Figura d) escala diária.

As escalas horárias e diárias e a forma de medição (estação pluviométrica em solo e o Satélite), são sensíveis a outros fatores que podem influenciar nas estimativas de precipitação, tais como a umidade e a temperatura, as quais variam em função do uso e cobertura, da altitude e da forma do relevo, o que explicaria as precipitações captadas pelo GPM e que não foram medidas pela estação.

Alguns autores como Maggioni e Massari (2018), sugerem que locais onde a umidade é baixa e a evaporação é alta, podem produzir “falsos positivos” no GPM, o que pode justificar a superestimação do GPM nas demais escalas temporais, quando analisados os acumulados mensais a anuais. Gadêlha (2018), observou uma superestimação por parte do GPM para a escala anual, na região centro-oeste do Brasil que tem como característica baixa umidade e alta evapotranspiração.

Embora os valores de coeficiente de determinação (R^2) e de Correlação de Pearson encontrados para essas escalas temporais citadas sejam baixos, isso não significa que a capacidade de predição de precipitação do GPM em relação a estação pluviométrica seja ineficiente.

4.2.3. CORRELAÇÃO POR UNIDADE GEOMORFOLÓGICA

Alguns autores como Caracciolo et al. (2018), Fang et al. (2019) e Jiang e Bauer-Gottwein (2019) e Lima (2019), relatam que a capacidade de predição do GPM em relação ao medido pela estação pluviométrica em solo, pode ser influenciada pela topografia, principalmente em áreas costeiras e com relevo movimentado.

A abordagem de agrupar os dados por unidade geomorfológica, permite a extrapolação da relação (GPM e Estação Pluviométrica) para a unidade a qual os dados estão inseridos, buscando compreender se existe alguma influência entre a cota altimétrica e a forma do terreno na predição da precipitação.

Dessa forma, os dados foram agrupados por unidades geomorfológicas, para serem analisados. Das 11 estações, 8 estão inseridas na unidade de Plano Intermediário e 2 na de rebordo e 1 na unidade de Planície (Figura 60).

De acordo com o mapeamento Geomorfológico do ZEE-DF, a unidade geomorfológica de Plano Intermediário é caracterizada por ser uma área de transição, inserida entre as cotas altimétricas de 950 a 1100 m, usualmente com declividades planas ($\leq 3\%$) ou suave onduladas (declividade entre 3 – 8 %). E a unidade geomorfológica de Rebordo é configurada por relevos ondulado, com declividades mais acentuadas que o plano intermediário, inseridas entre as cotas altimétricas de 1050 a 1100 m, configuram-se como uma área de transição para a unidade geomorfológica de escarpa.

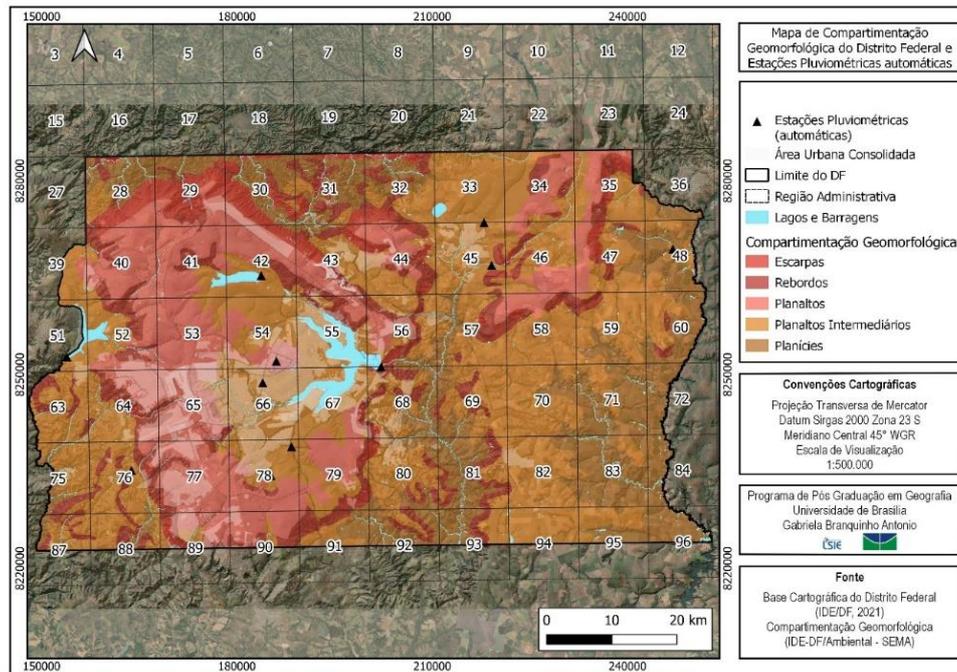


Figura 60 - Mapa das Estações Pluviométricas e do GRID/GPM em relação a Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal

No Tabela 15 e Tabela 16, é apresentados os valores das Correlações de Pearson por unidade geomorfológica, sendo respectivamente considerando o período chuvoso e o não chuvoso e na sequência considerando somente o período chuvoso.

Tabela 15 - Correção de Pearson por unidade geomorfológica (plano intermediário e rebordo) para o período chuvoso e o não chuvoso.

| Todos os dados do GPM e todos os dados da estação | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|
| Escala Temporal | Plano Intermediário (duas estações) | Rebordo (sete estações) |
| Anual | 0,66 | 0,95 |
| Trimestral | 0,97 | 0,98 |
| Mensal | 0,97 | 0,94 |
| Diário | 0,76 | 0,63 |
| Horário | 0,16 | 0,1 |

Tabela 16 - Correção de Pearson por unidade geomorfológica (plano intermediário e rebordo) para o período chuvoso.

| Todos os dados do GPM e todos os dados da estação para o período chuvoso | | |
|--|---------------------|---------|
| Escala Temporal | Plano Intermediário | Rebordo |
| Anual | 0,91 | -0,1 |
| Trimestral | 0,88 | 0,6 |
| Mensal | 0,84 | 0,2 |
| Diário | 0,46 | 0,2 |
| Horário | 0,19 | 0,01 |

Quando analisado o conjunto de todos os dados e somente o período de chuva, observa-se que há uma melhora nas correlações diárias e um melhor desempenho para os dados inseridos na unidade geomorfológica de plano intermediário, principalmente quando considerando somente o período chuvoso.

De maneira geral, observa-se, que a escala diária, apresentou melhores correlações na unidade geomorfológica de plano intermediário, para ambos os cenários.

As correlações para a unidade geomorfológica de rebordo, no cenário onde é considerado somente o período chuvoso é a mais fraca. Mesmo no cenário que considerou o conjunto de dados inteiro, a uma perda de desempenho para a escala diária. De acordo com, Bauer-Gottwein (2019), Mohamed et al. (2020), Teodoro (2021) e Filho et. al. (2022), a capacidade de detecção de precipitação por produtos de satélite são menos precisas em regiões de relevo movimentado.

4.2.4. CORRELAÇÃO POR FAIXA DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM 24 HORAS

Para essa análise foi escolhida a estação pluviométrica de medição em solo A046, do INMET, isso porque, ela apresentou melhores resultados de correlação, principalmente nas escalas diárias, acumulados de 3 horas e horária, se comparado as demais estações.

Alguns autores, como Li et al. (2021) e Pradhan et al. (2022) relatam um desempenho melhor do GPM na previsão de precipitações extremas, quando analisada determinadas faixas de precipitação. Outros autores como Liu et. al. (2020) analisam o desempenho do GPM em representar adequadamente a variabilidade temporal de um evento de precipitação extrema.

A análise das correlações por faixa de precipitação nesse trabalho, buscou entender se o cenário descrito pelos autores supracitados se confirma. De modo a se verificar, se considerado o contexto morfológico e climatológico do Distrito Federal, o GPM apresentaria desempenho satisfatório na previsão de eventos extremos e na variabilidade temporal de um evento de precipitação extrema.

Isso é importante quando se busca estudar eventos de precipitação extrema que ocorrem de forma concentrada em um curto período de tempo. Além disso, a análise por faixa de precipitação possibilita inferir se a forma dos hietograma de precipitação do GPM

e da estação pluviométrica em solo se assemelham, principalmente no que tange os ‘picos’ dos hietogramas.

As faixas de precipitação definidas nesse trabalho tiveram como base, as classes utilizadas por Mohammed et al. (2020) apud Zheng et al. (2014), outros autores como Franca e Silva (2021), também definem como tempestade as chuvas com precipitações iguais ou maiores que 50 mm/24horas.

Foram identificados nove eventos na faixa de precipitação de 0,1 a 10 mm/24 horas, oito eventos na 10 a 25 mm/24 horas, oito eventos na 25 a 50 mm/24 horas e três eventos na faixa de 50 a 100 mm/24 horas, que ocorreram nos dois conjuntos de dados (GPM e na estação pluviométrica A046).

Foram aplicadas três métricas estatísticas de performance, Correlação de Pearson (CP), Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2) e a Diferença das Médias (MD), para cada faixa de precipitação, considerando a sua distribuição horária ao longo de 24 horas (Tabela 17).

Tabela 17 - Resultados das Correlações de Pearson e Coeficiente de Determinação Ajustado para as faixas de precipitações acumuladas 24 horas.

| Faixa de Precipitação | Data | GRID 76 (Acumulado 24 horas) | A046 (Acumulado 24 horas) | CP | R^2 | MD |
|-----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| 0,1 a 10 mm | 28/10/2019 | 1.09 | 1.20 | -0.10 | 0.01 | -0.11 |
| | 13/01/2018 | 9.10 | 0.40 | -0.07 | 0.01 | 8.70 |
| | 21/01/2016 | 9.56 | 8.60 | -0.07 | 0.00 | 0.96 |
| | 12/01/2017 | 2.73 | 3.40 | 0.17 | 0.03 | -0.67 |
| | 02/01/2015 | 7.33 | 1.80 | 0.34 | 0.11 | 5.53 |
| | 04/02/2016 | 0.58 | 2.60 | 0.37 | 0.14 | -2.02 |
| | 13/12/2015 | 3.04 | 8.60 | 0.40 | 0.16 | -5.56 |
| | 24/01/2015 | 6.89 | 6.60 | 0.75 | 0.56 | 0.29 |
| | 04/04/2017 | 5.59 | 10.00 | 0.96 | 0.93 | -4.41 |
| 10 a 25 mm | 25/11/2018 | 16.49 | 24.00 | 0.15 | 0.02 | -7.51 |
| | 11/12/2017 | 23.38 | 16.80 | 0.44 | 0.19 | 6.58 |
| | 28/01/2015 | 19.14 | 16.80 | 0.51 | 0.26 | 2.34 |
| | 07/03/2018 | 18.05 | 10.40 | 0.57 | 0.33 | 7.65 |
| | 05/02/2019 | 23.89 | 13.20 | 0.69 | 0.48 | 10.69 |
| | 29/03/2017 | 14.37 | 19.40 | 0.73 | 0.06 | -5.03 |
| | 15/04/2019 | 14.00 | 11.00 | 0.80 | 0.64 | 3.00 |
| | 31/10/2015 | 15.61 | 21.80 | 0.86 | 0.74 | -6.19 |
| 25 a 50 mm | 26/12/2015 | 27.91 | 34.20 | 0.35 | 0.12 | -6.29 |
| | 18/02/2015 | 50.20 | 25.20 | 0.35 | 0.12 | 25.00 |

| Faixa de Precipitação | Data | GRID 76 (Acumulado 24 horas) | A046 (Acumulado 24 horas) | CP | R ² | MD |
|-----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|-------|----------------|--------|
| | 08/04/2019 | 49.11 | 29.80 | 0.56 | 0.32 | 19.31 |
| | 31/10/2016 | 36.60 | 29.20 | 0.61 | 0.37 | 7.40 |
| | 05/10/2016 | 26.26 | 46.00 | 0.66 | 0.44 | -19.74 |
| | 10/11/2018 | 43.99 | 26.60 | 0.88 | 0.77 | 17.39 |
| | 10/02/2018 | 27.53 | 34.40 | -0.07 | 0.00 | -6.87 |
| | 30/12/2017 | 31.12 | 30.60 | 0.62 | 0.38 | 0.52 |
| | 11/02/2017 | 31.28 | 27.40 | 0.81 | 0.66 | 3.88 |
| 50 a 100 mm | 20/01/2016 | 56.56 | 82.40 | 0.65 | 0.43 | -25.84 |
| | 07/02/2015 | 99.07 | 53.80 | 0.84 | 0.71 | 45.27 |
| | 05/03/2018 | 55.06 | 89.00 | 0.99 | 0.97 | -33.94 |

Dos nove eventos avaliados para a faixa 10 - 25 mm somente um deles apresentou uma correlação insatisfatória (10/02/2018). E dos 14 eventos analisados para a faixa de 25 a 50 mm somente 3 apresentaram correlações insatisfatórias. Nas faixas de precipitação acumulada em 24 horas que variam entre 10 - 25 mm e entre 25 a 50 mm, observamos que a maioria dos valores de CP são iguais ou maiores que 0,6 indicando correlações de satisfatórias a muito boas.

Para o intervalo de precipitação acumulado de 0,1 a 10 mm em 24 horas, os valores de CP são iguais ou menores que 0,4, com exceção de dois eventos, indicando um baixo desempenho para estimar as precipitações nessa faixa de precipitação.

Considerando os eventos apresentados na Tabela 17, a seguir são apresentados dois exemplos de hietogramas para as seguintes faixas de precipitação de 25 a 50 mm/24 horas (Figura 61 - Esquerda) e 50 a 100 mm/24 horas (Figura 61 - direita).

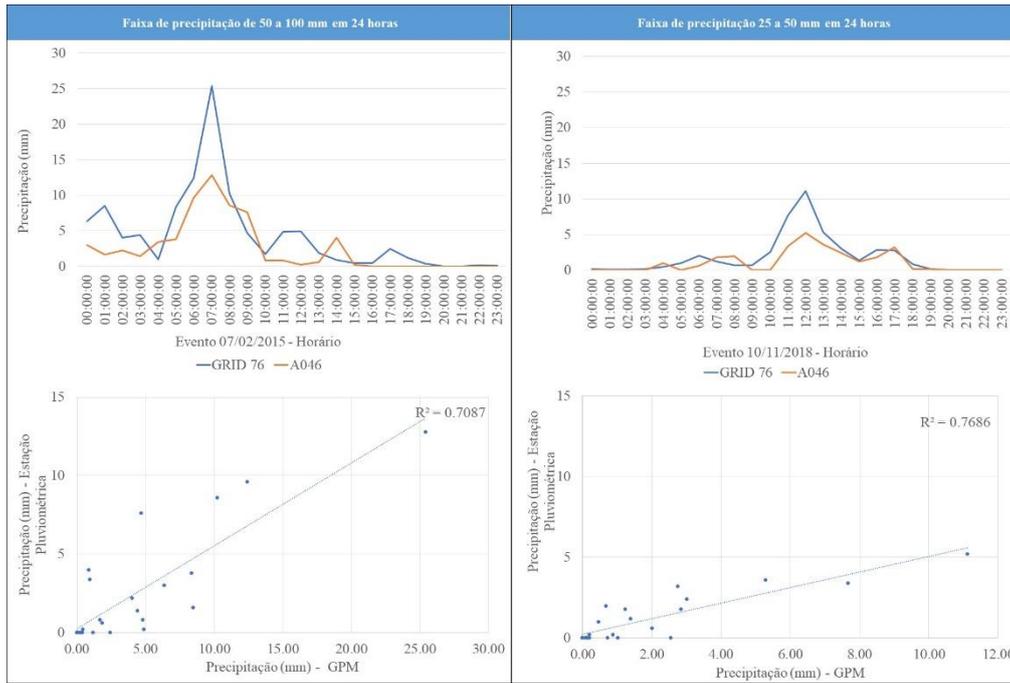


Figura 61 - Relação entre os hietogramas da Estação Pluviométrica e do GPM para a faixa de 25 a 50 mm/24 horas / para a faixa de 50 a 100 mm/24 horas, entre a A046 e o GRID do GPM 76.

No hietograma apresentado na Figura 61 A, para a para a faixa de precipitação de 0,1 a 10 mm/24 horas, observa-se que o Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2) e a Correlação de Pearson são fracas e os hietogramas não apresentam semelhança. Contudo, no hietograma apresentado na Figura 61 B e Figura 61 C, para as faixas de precipitação de 25 a 50 mm/24horas e 50 a 100 mm/24horas, observa-se uma melhora significativa nos valores de R^2 e na Correlação de Pearson, além disso, a semelhança entre os hietogramas.

Alguns autores como Li et al. (2021), Teodoro et al. (2021), indicam que a capacidade de predição do GPM, é reduzida quando ao tentar estimar precipitações leves (< 0 mm/24 horas). De modo que, a capacidade de predição é melhorada quando é analisado acumulados diários >10 mm.

Liu et. al. (2020), indicam que o GPM apresentou um melhor desempenho analisando a variabilidade do evento, em relação a estimativa dos totais acumulados.

Quando analisado o hietograma precipitação diário, a superestimação do GPM em relação ao medido na estação fica mais evidente quando ocorrem picos de volume precipitado, o mesmo foi observado por Pradhan et al. (2022). Entretanto, outros autores como Furl et al. (2018), Mazzoglio et. al. (2019), observam uma tendencia de subestimação do GPM em relação ao medido na estação pluviométrica.

Huang et al. (2019), ao analisar precipitações extremas, em outros contextos morfológicos regiões costeiras, observam uma tendência de subestimação, sendo menor no IMERG – F (produto calibrado).

4.2.5. DETALHAMENTO DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA A001 DO INMET

Considerando o interesse na Asa Norte no Plano Piloto, devido a alta quantidade de notificações de alagamento e a baixa disponibilidade de estações pluviométricas automáticas, nesse tópico, será detalhado a estação A001 do INMET para um período de 2005 a 2020.

4.2.5.1. Considerações iniciais sobre a qualidade dos dados de precipitação de medição em solo e do GPM

Foi utilizado uma série com um período de 15 anos (2020 a 2005), utilizando a estação automática A001 do INMET. Na Tabela 18 é apresentada a relação de quantidade falhas que ocorrem anualmente na série histórica e na Tabela 19 é apresentada a porcentagem de falha por mês.

Tabela 18 – Resumo da quantidade de dias com falha, dias sem falha e a porcentagem de falha por ano.

| Ano | Dias com falha | Dias sem falha | Porcentagem de falha no ano |
|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 2005 | 46 | 319 | 13 |
| 2006 | 56 | 309 | 15 |
| 2007 | 26 | 339 | 7 |
| 2008* | 9 | 357 | 2 |
| 2009 | 30 | 335 | 8 |
| 2010 | 22 | 343 | 6 |
| 2011 | 5 | 360 | 1 |
| 2012* | 8 | 358 | 2 |
| 2013 | 4 | 361 | 1 |
| 2014 | 0 | 365 | 0 |
| 2015 | 4 | 361 | 1 |
| 2016* | 1 | 365 | 0 |
| 2017 | 0 | 365 | 0 |
| 2018 | 4 | 361 | 1 |
| 2019 | 1 | 364 | 0 |
| 2020 | 0 | 366 | 0 |

*Anos bissextos

Tabela 19 – Resumo da porcentagem de falha por mês

| Ano/Mês | Porcentagem de falha por mês | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------------|------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | Jan. | Fev. | Março | Abril | Mai | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
| 2020 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2019 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 2018 | 10 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2017 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2016 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015 | 6 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 2014 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2013 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 2012 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 7 | 6 | 3 | 0 | 0 | 7 | 0 |
| 2011 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2010 | 10 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2009 | 3 | 11 | 0 | 3 | 0 | 7 | 3 | 3 | 0 | 23 | 0 | 45 |
| 2008 | 0 | 3 | 13 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 7 | 3 | 0 | 0 |
| 2007 | 0 | 7 | 10 | 10 | 26 | 7 | 0 | 6 | 0 | 0 | 17 | 3 |
| 2006 | 6 | 25 | 6 | 13 | 55 | 7 | 6 | 13 | 10 | 6 | 13 | 23 |
| 2005 | 3 | 7 | 3 | 10 | 13 | 0 | 3 | 6 | 3 | 87 | 3 | 10 |

4.2.5.2. Análise do GPM X Estação Pluviométrica em Solo

Considerando a série histórica de 15 anos o equivalente a 5843 dias, foram observados 5628 dias sem falhas e 2091 dias com chuva (qualquer valor maior 0) e 3537 dias sem chuva. As chuvas mais frequentes observadas em ambos os conjuntos de dados (INMET e GPM), foram o chuvisco (0,1 a 10 mm/24h), como pode ser observado na Figura 62. O mesmo foi observado por Silva et al (2021) e Franca et al (2022), onde os valores de precipitação mais frequente foram relativos ao chuvisco e a chuva fraca.

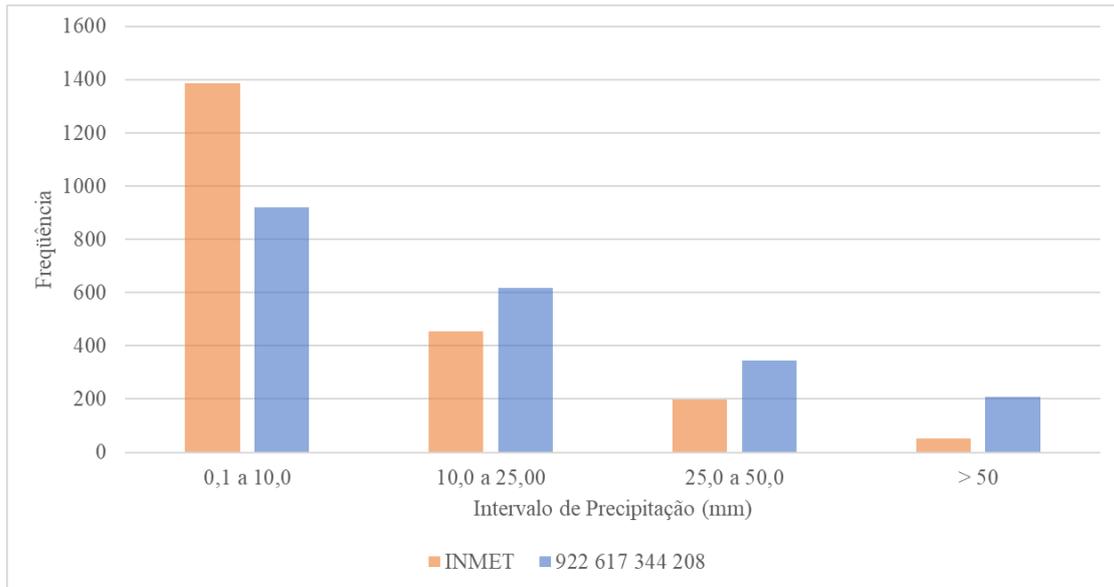


Figura 62 – Histograma de frequência das precipitações medidas pela estação pluviométrica A001 do INMET e pelo GPM.

É interessante observar que, a estação pluviométrica do INMET capta mais eventos de precipitações fracas, se comparado ao GPM. Enquanto o GPM capta mais eventos de precipitações relativamente forte aos extremos do que a estação pluviométrica.

Isso pode ter como explicação, a forma de medição de precipitação do GPM e a irregularidade no padrão de chuvas que ocorre no Distrito Federal. De modo que, as precipitações mais intensas registradas pelo GPM podem não ter ocorrido precisamente onde a estação pluviométrica está localizada.

Na Figura 63, é possível observar que o GPM apresenta picos de precipitação acumulada superiores ao da estação pluviométrica A001. De modo que, o GPM estimou 208 eventos de precipitação extrema (> 50mm/24h), contudo 36 são > 100mm/24h e 1 é > 200mm/24h, que ocorreu em 14 de abril de 2014.

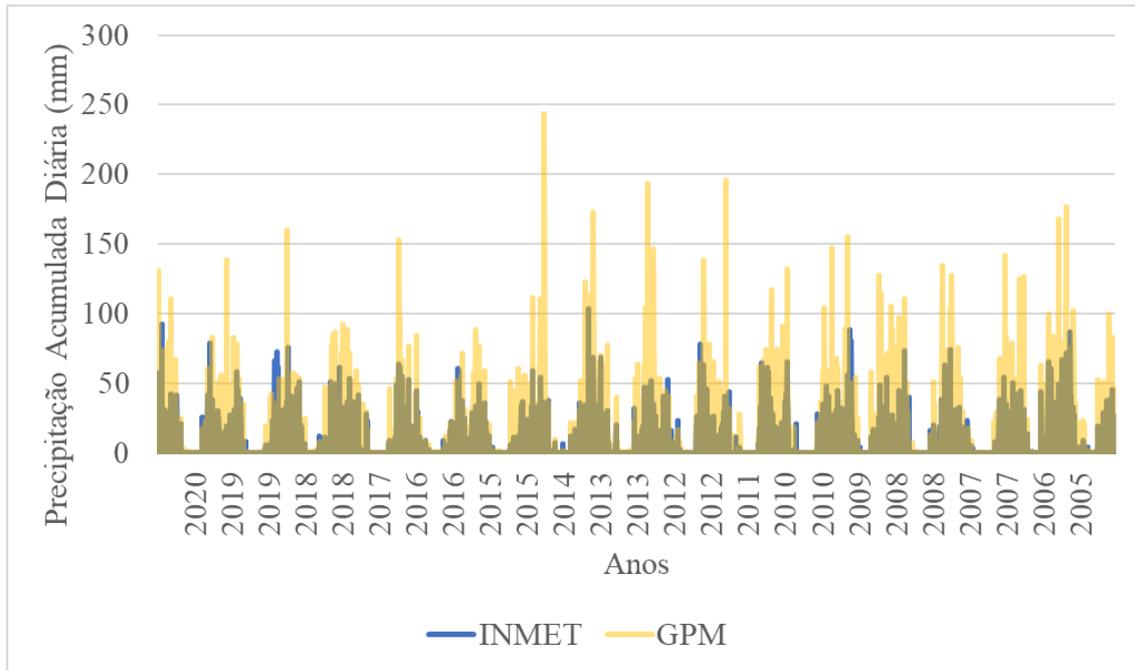


Figura 63 – Hietograma de precipitação diária do GPM e da estação pluviométrica do INMET A001, ao longo de 15 anos.

Quando aplicada as métricas estatísticas de performance, Correlações de Pearson (CP), Diferenças das Média (MD) e Raiz quadrada do erro-médio (RMSE), buscando entender o grau de concordância entre a precipitação estimada pelo GPM e a precipitação medida pela estação pluviométrica, observasse uma correlação média aceitável, com CP de 0,61.

Quando avaliado o MD e o RMSE, observasse que o GPM tende a apresentar estimativas de precipitação superestimadas em relação ao que foi medido na estação pluviométrica (A001 do INMET), de modo que o RMSE médio é 12,33 mm ao dia e o MD médio é de -4,14 ao dia.

Quando avaliado ano a ano, as Correlações de Pearson tendem a apresentar mais anos com CP variando de 0,5 a 0,7, com exceção de três anos (2009, 2018 e 2019), os quais apresentaram CP variando entre 0,4 e 0,5. Com relação RMSE, os anos de 2006 e 2005 apresentam os maiores valores, sendo eles respectivamente de 14,45 mm ao dia e 15,06 mm ao dia. Na Tabela 20, contém o resumo métricas estatísticas de performance aplicadas ao conjunto de dados.

Tabela 20 - Resumo métricas estatísticas de performance: Correlações de Pearson (CP), Diferenças das Média (MD) e Raiz quadrada do erro-médio (RMSE).

| Métricas Estatísticas de Performance | | | |
|---|--------------------------|----------------|------------------|
| Ano | CP (adimensional) | MD (mm) | RMSE (mm) |
| 2020 | 0,72 | -3,81 | 12,70 |
| 2019 | 0,48 | -3,15 | 10,52 |
| 2018 | 0,45 | -3,42 | 11,84 |
| 2017 | 0,67 | -3,10 | 11,54 |
| 2016 | 0,59 | -3,73 | 9,44 |
| 2015 | 0,59 | -3,87 | 9,75 |
| 2014 | 0,54 | -4,12 | 13,58 |
| 2013 | 0,64 | -4,17 | 13,80 |
| 2012 | 0,62 | -3,77 | 12,18 |
| 2011 | 0,64 | -4,67 | 12,91 |
| 2010 | 0,64 | -3,95 | 12,24 |
| 2009 | 0,49 | -4,48 | 12,66 |
| 2008 | 0,61 | -5,20 | 12,92 |
| 2007 | 0,63 | -3,64 | 11,76 |
| 2006 | 0,69 | -5,94 | 14,45 |
| 2005 | 0,70 | -5,17 | 15,06 |
| Média | 0,61 | -4,14 | 12,33 |

A resolução espacial dos dados é um fator que deve ser considerado na análise, isso porque, a estação pluviométrica é uma medição local em um ponto e o GPM realiza uma estimativa de uma área de 10 km².

Dessa forma, as estatísticas de contingência, versam em buscar compreender se o GPM está identificando de forma adequada ou não as precipitações. Na Tabela 21, são apresentadas as Métricas Estatísticas de Contingência, Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR) e Índice de Sucesso Crítico (CSI).

Tabela 21 - Resumo Métricas Estatísticas de Contingência: Probabilidade de Detecção (POD), Taxa de Alarme Falso (FAR) e Índice de Sucesso Crítico (CSI).

| Métricas Estatísticas de Contingência | | | |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ano | POD (adimensional) | FAR (adimensional) | CSI (adimensional) |
| 2020 | 0,99 | 0,34 | 0,65 |
| 2019 | 0,99 | 0,40 | 0,59 |
| 2018 | 0,98 | 0,35 | 0,64 |
| 2017 | 0,98 | 0,42 | 0,57 |
| 2016 | 1,00 | 0,47 | 0,53 |
| 2015 | 0,96 | 0,41 | 0,58 |

| Métricas Estatísticas de Contingência | | | |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ano | POD (adimensional) | FAR (adimensional) | CSI (adimensional) |
| 2014 | 0,98 | 0,44 | 0,56 |
| 2013 | 0,99 | 0,38 | 0,62 |
| 2012 | 0,98 | 0,39 | 0,60 |
| 2011 | 0,98 | 0,33 | 0,66 |
| 2010 | 0,99 | 0,33 | 0,67 |
| 2009 | 0,97 | 0,37 | 0,61 |
| 2008 | 0,98 | 0,39 | 0,60 |
| 2007 | 0,97 | 0,43 | 0,56 |
| 2006 | 0,97 | 0,29 | 0,69 |
| 2005 | 0,96 | 0,34 | 0,64 |
| Média | 0,98 | 0,38 | 0,61 |

Os valores de POD mais próximos de 1, indicam a capacidade do GPM em detectar as precipitações, de modo que, para todos os anos analisados foram encontrados valores de POD maiores que 0,96.

O FAR, indica os alarmes falsos, valores de precipitação que foram estimados pelo GPM, mas que não foram captados pela estação pluviométrica, de modo que, quanto mais próximo de 0 melhor o resultado. De maneira geral, são observados valores de FAR menores que 0,5, de modo que o ano de 2006 apresentou o menor valor, mais próximo do ótimo.

Os resultados encontrados nesse trabalho para CSI (0,61), se assemelham ao valor encontrado por Gadêlha (2018), que encontrou 0,70. Em relação ao POD, o outro supracitado encontrou 0,77 enquanto, nessa pesquisa foi encontrado 0,98. Contudo, considerando o índice de alarmes falsos (FAR), Gadêlha (2018) achou resultados superiores (0,11) aos encontrados aqui (0,38).

4.2.5.3. Análise dos Eventos Extremos de Precipitação

Foram identificados ao todo 24 eventos extremos, cujo as precipitações são iguais ou maiores que 50 mm acumulado em 24 horas, nos dois conjuntos de dados. Para tais eventos foram calculados os seus respectivos tempos de retorno, aplicando a Curva IDF – DF, os quais podem ser observados na Tabela 22.

Tabela 22 – Relação de eventos estimados pelo GPM com tempos de retorno maiores que 50 anos.

| Ano | Data | INMET (mm) | GPM (mm) | Intensidade INMET (mm/h) | Intensidade GPM (mm/h) | TR – INMET (anos) | TR – GPM (anos) |
|-------------|-------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 2020 | 05/jan | 57.40 | 110.41 | 2 | 5 | 1 | 18 |

| Ano | Data | INMET (mm) | GPM (mm) | Intensidade INMET (mm/h) | Intensidade GPM (mm/h) | TR – INMET (anos) | TR – GPM (anos) |
|------|--------|---------------|-------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 2020 | 26/jan | 92.80 | 51.25 | 4 | 2 | 8 | 0 |
| 2019 | 11/abr | 58.00 | 74.55 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| 2017 | 26/nov | 64.00 | 152.97 | 3 | 6 | 1 | 88 |
| 2017 | 30/nov | 61.20 | 97.79 | 3 | 4 | 1 | 10 |
| 2017 | 15/dez | 55.20 | 66.59 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 2016 | 13/nov | 59.20 | 50.48 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 2014 | 22/jan | 58.80 | 111.34 | 2 | 5 | 1 | 19 |
| 2014 | 17/dez | 103.80 | 113.47 | 4 | 5 | 13 | 21 |
| 2013 | 16/jan | 68.80 | 173.01 | 3 | 7 | 2 | 159 |
| 2013 | 25/fev | 68.60 | 70.05 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 2012 | 01/nov | 62.80 | 124.11 | 3 | 5 | 1 | 32 |
| 2012 | 03/nov | 54.00 | 68.39 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 2011 | 25/nov | 58.00 | 68.25 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 2010 | 04/abr | 53.00 | 132.04 | 2 | 6 | 1 | 43 |
| 2009 | 04/abr | 56.00 | 155.39 | 2 | 6 | 1 | 95 |
| 2009 | 26/abr | 80.80 | 50.61 | 3 | 2 | 4 | 0 |
| 2008 | 04/abr | 73.00 | 110.79 | 3 | 5 | 2 | 18 |
| 2008 | 28/nov | 63.20 | 53.56 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 2007 | 01/jan | 74.00 | 103.79 | 3 | 4 | 3 | 13 |
| 2006 | 07/out | 65.20 | 84.44 | 3 | 4 | 1 | 5 |
| 2005 | 09/jan | 67.00 | 79.58 | 3 | 3 | 2 | 4 |
| 2005 | 02/fev | 71.60 | 177.00 | 3 | 7 | 2 | 177 |
| 2005 | 01/mar | 87.20 | 67.30 | 4 | 3 | 6 | 2 |

Quando calculado o tempo de retorno das precipitações acumuladas diárias, observasse que o GPM apresenta 14 eventos de precipitação que possuem tempos de retorno maiores que 50 anos, conquanto que, as precipitações medidas pela estação pluviométrica apresentam somente um evento com tempo de retorno maior que 10 anos, tendo ele ocorrido no dia 17 de dezembro de 2014 com uma precipitação de 103,8 mm/24h (TR de 13 anos). Sendo o tempo de retorno de 2 anos (maior que 0 e menor 2), em ambos os conjuntos de dados.

Dos 24 eventos de precipitação extrema, foram escolhidos aleatoriamente 7 eventos extremos para análise dos dados na escala horária. Inicialmente foram aplicadas as estatísticas de performance, de modo que, dos 7 eventos escolhidos 5 deles apresentam Correlação de Pearson superior a 0,6. No que tange ao RMSE, observasse que em média há uma superestimação de máxima de 6,21 mm no evento ocorrido em 15 de dezembro de 2017 (Tabela 23).

Tabela 23 - Estatística de Performance dos Eventos Extremos (>50 mm)

| Estatística de Performance dos Eventos Extremos (>50 mm) | | | | | | |
|--|-------------|-------------------------------------|-----------------|-----------|----------------------|-------------|
| Ano | Data | Precipitação INMET A001 (mm) | GPM (mm) | CC | R² | RMSE |
| 2014 | 17/dez | 103,80 | 113,47 | 0,72 | 0,52 | 5,17 |
| 2014 | 22/jan | 58,80 | 111,34 | 0,48 | 0,23 | 2,46 |
| 2016 | 13/nov | 59,20 | 50,48 | 0,25 | 0,06 | 1,74 |
| 2017 | 15/dez | 55,20 | 66,59 | 0,80 | 0,63 | 6,21 |
| 2017 | 26/nov | 64,00 | 152,97 | 0,65 | 0,43 | 1,53 |
| 2017 | 30/nov | 61,20 | 97,79 | 0,82 | 0,68 | 2,40 |
| 2019 | 11/abr | 58,00 | 74,55 | 0,87 | 0,75 | 5,48 |

4.3.MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE ALAGAMENTOS

A metodologia explicitada, foi aplicada em seis áreas urbanas do Distrito Federal inseridas nas seguintes Regiões Administrativas, Santa Maria no entorno da Via Alagados (18,19 km²), Planaltina na Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Mestre D'Armas I (7,32 km²), Vicente Pires - Área de Regularização de Interesse Especial – ARINE Vicente Pires (12,27 km²), Núcleo Bandeirante cuja a área de interesse é a Área de Regularização de Interesse Social – ARIS Vila Cauhy (12,04 km²), Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia (14,24 km²) e a Asa Norte no Plano Piloto (24 km²).

A bacia localizada na Região Administrativa do Plano Piloto - Asa Norte foi escolhida para realizar as etapas de análise de sensibilidade e calibração devido à maior quantidade de pontos de notificação com fotos nessa região.

No entanto, as etapas de análise de sensibilidade e calibração foram realizadas apenas utilizando a bacia urbana inserida na Região Administrativa do Plano Piloto - Asa Norte.

4.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A SENSIBILIDADE DO MODELO A VARIÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING

O coeficiente de rugosidade de Manning é um parâmetro que indica quão rugosa é uma superfície, exercendo influência na resistência do fluxo, dessa forma, no atrito e na velocidade do escoamento superficial (FLO-2D, 2021). De acordo com Oliveira (2021), devido à complexidade de modelos hidrodinâmicos, o coeficiente de rugosidade de Manning, é usualmente o único parâmetro calibrado, isso porque, ele é o principal fator de controle da resistência do escoamento superficial (FLO-2D, 2021).

Para realizar essa análise de sensibilidade, foram realizadas três simulações, com os coeficientes de rugosidade de Manning mínimo, máximo e médio. Para isso foi utilizado o evento ocorrido no dia 17/12/2014, o qual foi simulado uma precipitação de 74,93 mm com hietograma de duração de 5 hora e simulação de 24 hora.

Dessa forma, observou-se que com relação a extensão da mancha alagada (considerando somente as lâminas de água maiores que 10 cm), houve pouca variação utilizando a rugosidade mínima, média e máxima, de modo que a variação entre a mínima e a máxima foi menor que 0,05% (Figura 64).

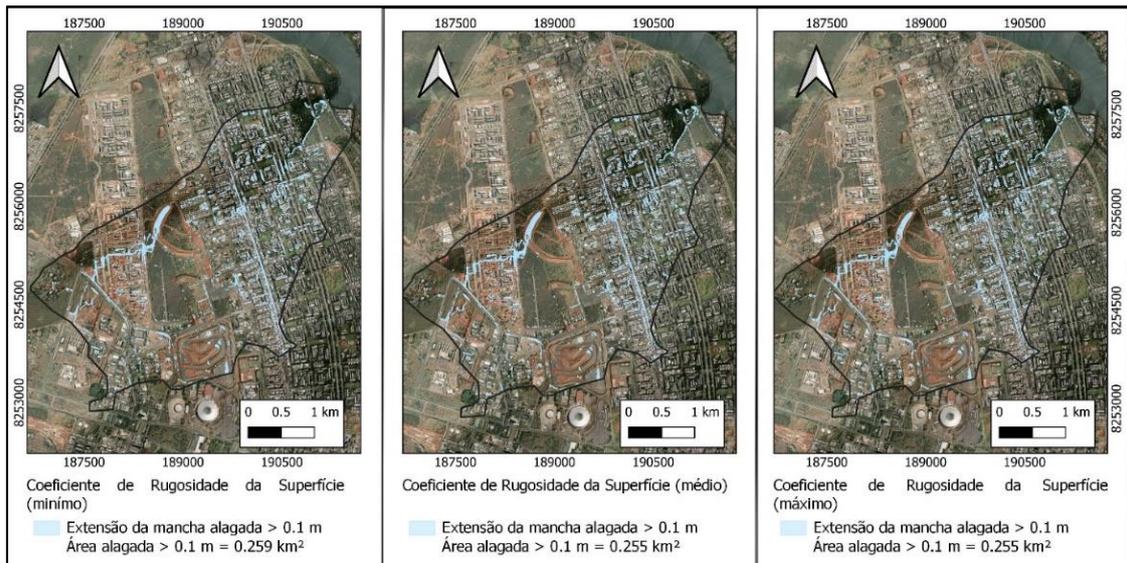


Figura 64 – Extensão da mancha de alagamento para diferentes valor de coeficiente de manning

Contudo, ao observar as velocidades máximas do escoamento superficial, que é um dos critérios a ser verificado, pois podem indicar instabilidade numérica e problemas de conservação do volume, notou-se uma discrepância entre o pico de velocidade associado a rugosidade mínima que foi de 3,63 m/s e os picos de velocidade associados à rugosidade média e máxima, que foram respectivamente 1,90 m/s e 1,89 m/s (Figura 65).

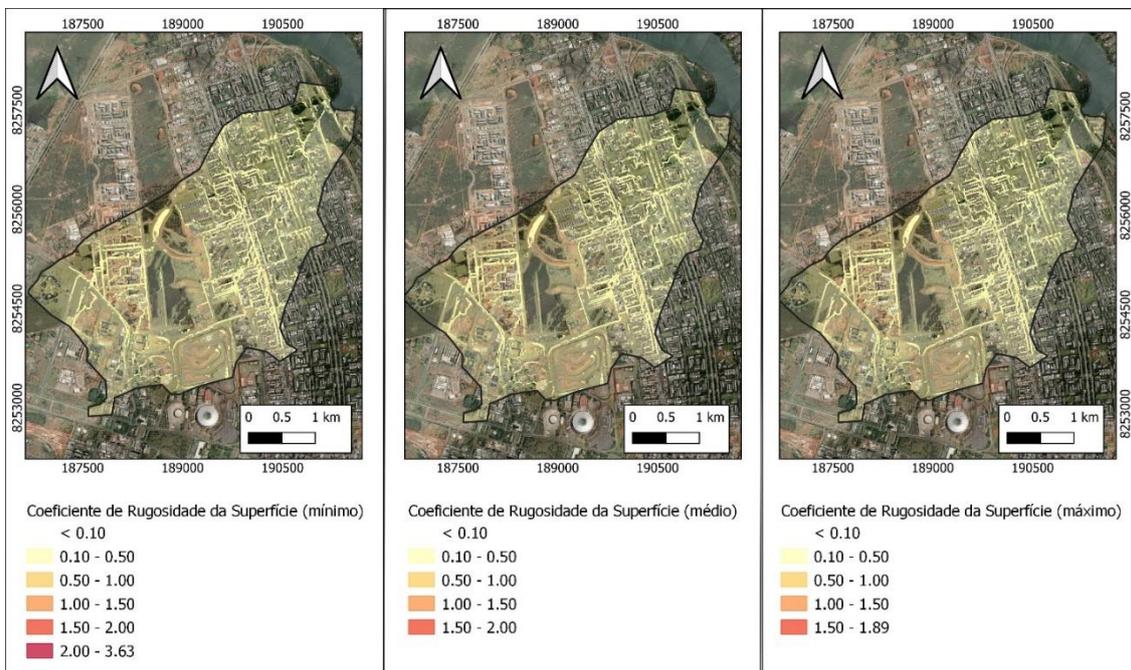


Figura 65 – Velocidade Máxima do Alagamento (m/s) para diferentes valor de coeficiente de manning

Nos gráficos apresentados na Figura 66, Figura 67 e Figura 68, relativos à rugosidade mínima, média e máxima, observa-se a conservação do volume ao longo da simulação.

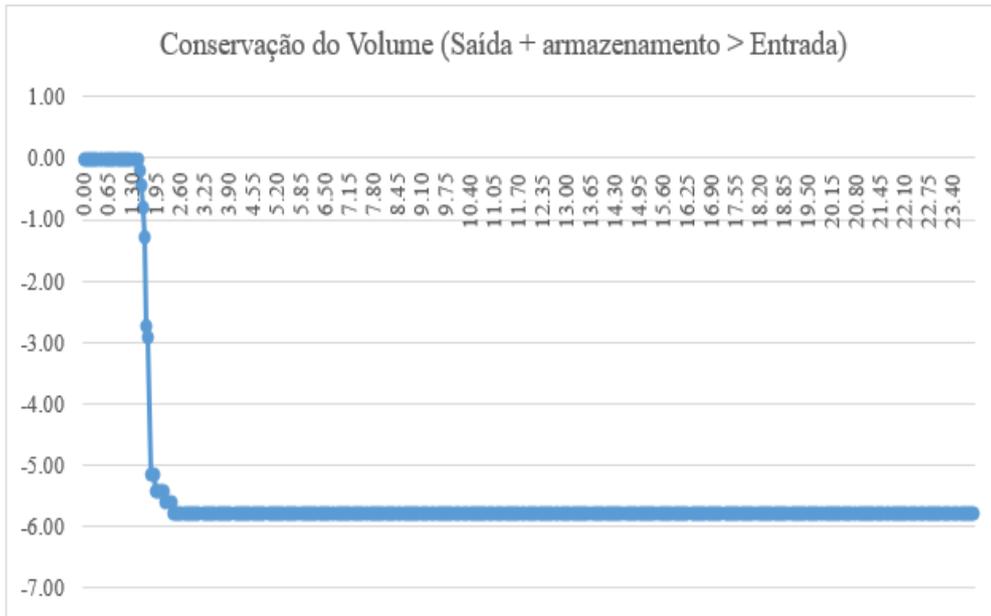


Figura 66 – Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade mínima, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

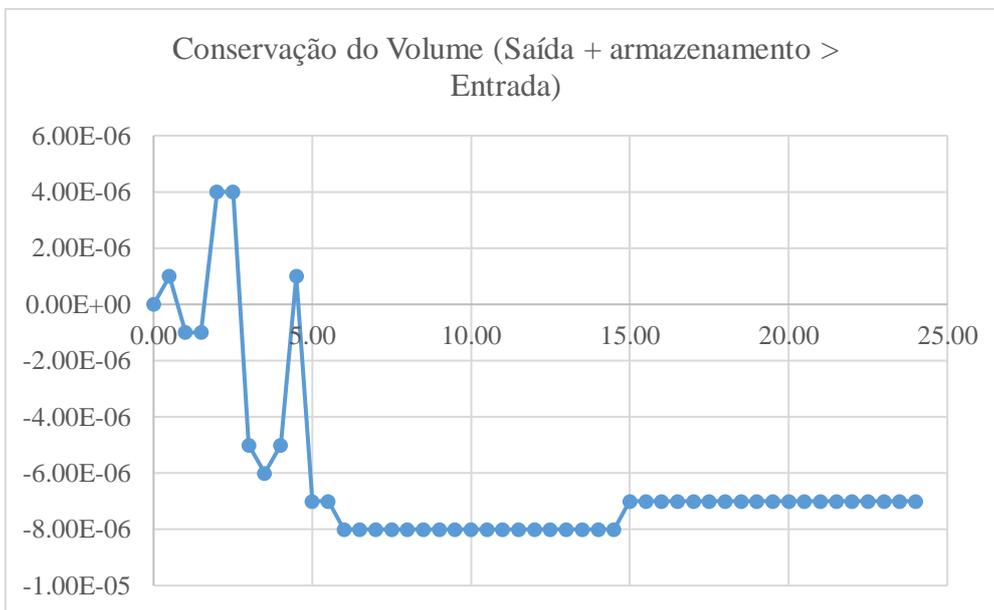


Figura 67 - Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade média, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

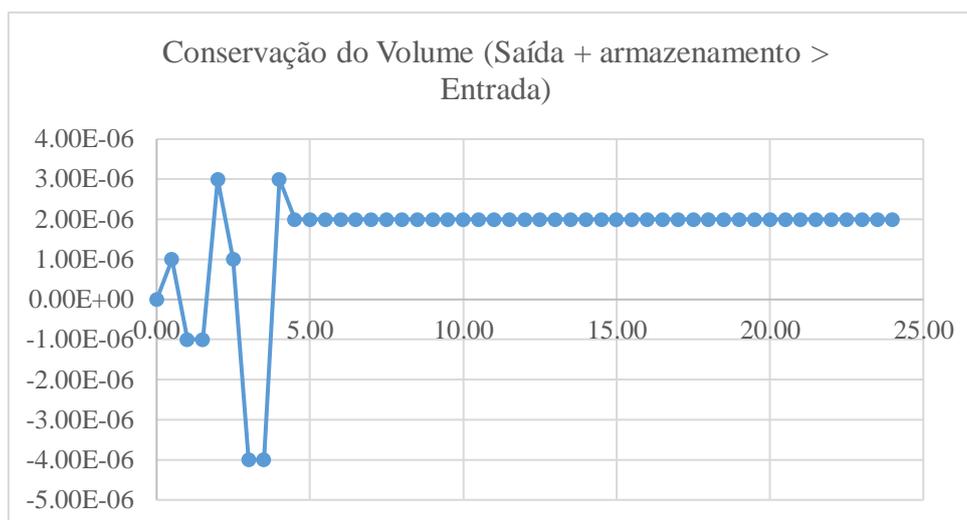


Figura 68 - Conservação do volume para o evento 17/12/2014, simulado utilizando a rugosidade máxima, para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Observa-se que, o gráfico da Figura 66, relativo à conservação do volume da simulação utilizando os valores de rugosidade mínima, apresenta variações superiores a 0,001 %, indicando que esses valores de rugosidade produzem instabilidade no modelo ao longo de toda a simulação.

Os valores de rugosidade médio e máximo, apresentam uma amplitude de valores menores que 0,001 %, indicando que esses valores seriam mais adequados. Embora os valores de rugosidade médio e máximo tenham apresentado resultados satisfatórios, atendendo aos critérios de estabilidade numérica e conservação de volume, optou-se por utilizar os valores de coeficiente de rugosidade de manning médio, por apresentarem uma amplitude de valores menores.

4.3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CALIBRAÇÃO

A calibração foi realizada de forma manual. Ao final da simulação, o modelo FLO-2D gera um conjunto de arquivos com as extensões .CHK e .RGH, que fornecem informações sobre os ajustes que deveriam ser feitos em um ou mais dados de entrada.

Dessa forma, a calibração teve início com os valores de rugosidade de manning médio e foi sendo ajustado manualmente a cada nova simulação. O modelo FLO-2D, durante a simulação, calcula novos valores de rugosidade de manning a partir do parâmetro “*Shallow Flow Roughness*” (0,2 adimensional) para os elementos onde ocorre fluxo raso com valores manning baixos, objetivando evitar que ocorra velocidades excessivamente altas e dessa forma, evitar problemas de instabilidade numérica no modelo.

Os valores de rugosidade manning calculados pelo modelo, ficam registrados no arquivo MANNINGS_N.RGH, de modo que, a cada nova simulação, um novo arquivo MANNINGS_N.RGH é escrito e armazenado. Dessa forma, o modelador deve observar se os valores calculados e sugeridos pelo modelo, são condizentes com a realidade, visando não adotar valores inadequados.

Ao final do processo de calibração, quando os dados de entrada não produzem instabilidade numérico e problemas de conservação de volume, foi analisado o quanto de ajuste foi realizado na rugosidade manning.

Analisando o valor médio da rugosidade de todo o conjunto de dados, independente da classe de uso e cobertura da terra, observou-se que, o ajuste entre a rugosidade inicial e a final foi inferior a 1%, sendo o MD de 8.5E-06 e o RMD de 0,009. E quando analisado a rugosidade inicial e a final por classe de uso e cobertura da terra, observa-se que as áreas recobertas por materiais impermeáveis, tais como o sistema viário e os estacionamentos, foram as classes que mais solicitaram ajuste, devido aos baixos valores de rugosidade que usualmente são adotados (0,011) e a lâmina de água baixa (Tabela 24).

Tabela 24 – Metricas do ajuste do coeficiente de manning por classe de uso e cobertura do solo.

| Uso e Cobertura do Solo | Sub1 - 17/12/2014 | |
|-------------------------|-------------------|-------|
| | MD | RMD |
| Sistema Viário | 2.90E-05 | 0.153 |
| Estacionamento | 9.80E-06 | 0.075 |
| Solo Exposto | 0.00E+00 | 0.000 |
| Cerrado baixa densidade | 0.00E+00 | 0.000 |
| Cerrado alta densidade | 0.00E+00 | 0.000 |
| Campestre | 0.00E+00 | 0.000 |
| savânica | 0.00E+00 | 0.000 |
| florestal | 0.00E+00 | 0.000 |
| massa arbórea | 0.00E+00 | 0.000 |
| passeio e calçada | 0.00E+00 | 0.000 |
| quadras | 0.00E+00 | 0.000 |
| vegetação urbana | 1.00E-06 | 0.001 |

As classes de uso e cobertura do solo da terra impermeáveis, como concreto e/ou asfalto, de acordo com a literatura, exibem valores de rugosidade de manning mais baixos (relativos a concreto e/ou asfalto) e apresentam uma menor resistência do ao fluxo, favorecendo a propagação do escoamento superficial em com velocidades mais elevadas.

Dentre as classes de uso e cobertura do solo da terra impermeáveis, o sistema viário teve um ajuste de 0,15% e o estacionamento 0,07%, em relação ao valor inicial 0,011. No que tange às classes de uso e cobertura permeáveis, a classe de vegetação urbana foi ajustada em 0,000646%.

Cabe ressaltar que, por se tratar de um modelo distribuído e de uma simulação em escala de detalhe, o RMD foi calculado com base no valor médio dos elementos, de cada classe de uso e cobertura do solo.

Com relação aos demais dados de entrada, seguem os ajustes que foram realizados:

- a) A rugosidade da rede de drenagem coletora, foi definido que coletores entre 2 e 10 metros a rugosidade adotada foi de 0,015 e para coletores maiores que 10 metros, foi adotada a rugosidade adotada foi de 0,011;
- b) De acordo com o FLO-2D (2021), quando é adotado uma escala de detalhe, como elementos pequenos, o Fator de Redução de Área pode incrementar a possibilidade de instabilidade do modelo nos elementos que ficam parcialmente bloqueados. Isso ocorre devido à baixa disponibilidade de área livre dentro do elemento e da declividade que ele pode produzir. Dessa forma, foi adotado um cenário conservador em que todos os elementos parcialmente bloqueados, estariam totalmente bloqueados. Como o modelo tem uma escala de detalhe, simplificação adotada não gera ônus para o modelo; e,
- c) O Número de *Courant*, controla a velocidade com que a onda do escoamento superficial é propagada. De acordo com o FLO-2D (2021), quando é utilizado intervalos de tempo pequenos e elementos em escala de detalhe, recomenda-se iniciar a simulação com o valor de *Courant* de 0,4 e aumentá-lo gradativamente. Neste trabalho, foi adotado somente o valor de 0,4, visto que o incremento do Número de *Courant* produzia velocidades exageradas.

Além disso, é importante frisar que, embora o modelo indique quais os elementos e valores que devem ser ajustados, é importante observar o impacto que o ajuste em um determinado elemento, pode gerar nos elementos adjacentes. Em tempo, reforçamos que os ajuste sugeridos pelo modelo, precisam ser analisados e não acatados imediatamente, isso porque o ajuste produzido pelo modelo é meramente matemático, podendo não ser condizentes com a realidade.

4.3.3. SIMULAÇÃO DE TEMPO DE RETORNO E ANÁLISE DE PONTOS CRÍTICOS

Nessa pesquisa, foram estudadas 6 sub-bacias hidrográficas urbanas, as quais estão inseridas em diferentes regiões administrativas do Distrito Federal, com diferentes contextos de ocupação urbana. Embora, muito se discuta sobre o impacto que a urbanização desordenada causa no território (SANTOS et al., 2016; SUBRINA e CHOWDHURY, 2018; WARD et. al., 2020), pouco se fala sobre áreas que, mesmo apresentando um histórico de ocupação planejada, apresentam problemas semelhantes.

O Plano Piloto-DF, é um exemplo de cidade que, embora tenha tido uma ocupação planejada, desde a sua concepção, é acometida por alagamentos (STEINKE e BARROS, 2015). Atualmente, é a Região Administrativa com mais notificações de alagamento, superando inclusive as Regiões Administrativas que apresentam ocupações irregulares e dispõem de poucos serviços de infraestrutura básica.

Embora os alagamentos apresentem impactos negativos menores que outros eventos hidrológicos, atualmente, são caracterizados como um problema crônico no DF e de muitas cidades, devido a frequência com que ocorrem (YANG et. al., 2020). Dessa forma, podem expor a população que reside em regiões que são economicamente e socialmente mais vulneráveis a um perigo potencial maior, até maior do que as regiões mais notificadas, e que apresentam um perfil socioeconômico melhor (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com Costabille et. al. (2019), uma das formas de caracterizar o perigo do alagamento, é através dos parâmetros produzidos por modelos, tais como extensão do alagamento, altura da lâmina de água e velocidade do fluxo. Dessa forma, inicialmente, foi analisada a relação da extensão da mancha de alagamento (durante o pico da precipitação e no momento final da simulação), considerando como mancha alagada, qualquer lâmina de água maior que 1 cm (0,01 m).

Na Tabela 25, observamos que embora o tempo de simulação (24 horas) não tenha sido o suficiente para absorver e transportar todo o escoamento superficial, observa-se que, como exceção da Asa Norte, todas as bacias apresentaram uma redução significativa da mancha alagada.

Tabela 25 – Resumo das extensões das manchas de alagamento

| Mancha de alagamento máxima (km²) | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Área de estudo | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |
| Asa Norte / Plano Piloto | 6.17 | 7.28 | 8.39 | 9.35 | 10.41 |
| Santa Maria | 5.01 | 5.79 | 6.56 | 7.64 | 8.51 |
| Núcleo Bandeirante | 3.17 | 3.96 | 4.57 | 5.45 | 6.19 |
| Vicente Pires | 3.63 | 4.67 | 5.51 | 6.65 | 7.51 |
| Mestre D' Armas | 2.36 | 2.69 | 2.94 | 3.28 | 3.53 |
| Sol Nascente | 2.78 | 3.67 | 3.67 | | 4.82 |
| Mancha de alagamento no momento final da simulação (km²) | | | | | |
| Área de estudo | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |
| Asa Norte / Plano Piloto | 3.52 | 4.09 | 4.62 | 5.26 | 5.90 |
| Santa Maria | 0.85 | 0.92 | 1.00 | 1.10 | 1.13 |
| Núcleo Bandeirante | 0.52 | 0.58 | 0.63 | 0.71 | 0.77 |
| Vicente Pires | 0.32 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.45 |
| Mestre D' Armas | 0.55 | 0.59 | 0.62 | 0.66 | 0.69 |
| Sol Nascente | 0.53 | 0.61 | 0.61 | | 0.70 |
| Relação do quanto a mancha de alagamento reduziu entre o pico do alagamento e o final da simulação (%) | | | | | |
| Área de estudo | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |
| Asa Norte / Plano Piloto | 43 | 44 | 45 | 44 | 43 |
| Santa Maria | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 |
| Núcleo Bandeirante | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
| Vicente Pires | 91 | 93 | 93 | 93 | 94 |
| Mestre D' Armas | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 |
| Sol Nascente | 81 | 83 | 83 | | 86 |
| Mancha de alagamento máxima (km²) | | | | | |
| Área de estudo | Tempo de Retorno | | | | |
| | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |
| Asa Norte / Plano Piloto | 6.17 | 7.28 | 8.39 | 9.35 | 10.41 |
| Santa Maria | 5.01 | 5.79 | 6.56 | 7.64 | 8.51 |
| Núcleo Bandeirante | 3.17 | 3.96 | 4.57 | 5.45 | 6.19 |
| Vicente Pires | 3.63 | 4.67 | 5.51 | 6.65 | 7.51 |
| Mestre D' Armas | 2.36 | 2.69 | 2.94 | 3.28 | 3.53 |
| Sol Nascente | 2.78 | 3.67 | 3.67 | | 4.82 |
| Mancha de alagamento no momento final da simulação (km²) | | | | | |
| Área de estudo | Tempo de Retorno | | | | |
| | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |

| | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Asa Norte / Plano Piloto | 3.52 | 4.09 | 4.62 | 5.26 | 5.90 |
| Santa Maria | 0.85 | 0.92 | 1.00 | 1.10 | 1.13 |
| Núcleo Bandeirante | 0.52 | 0.58 | 0.63 | 0.71 | 0.77 |
| Vicente Pires | 0.32 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.45 |
| Mestre D' Armas | 0.55 | 0.59 | 0.62 | 0.66 | 0.69 |
| Sol Nascente | 0.53 | 0.61 | 0.61 | | 0.70 |
| Relação do quanto a mancha de alagamento reduziu entre o pico do alagamento e o final da simulação (%) | | | | | |
| Área de estudo | Tempo de Retorno | | | | |
| | TR 2 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 |
| Asa Norte / Plano Piloto | 43 | 44 | 45 | 44 | 43 |
| Santa Maria | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 |
| Núcleo Bandeirante | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
| Vicente Pires | 91 | 93 | 93 | 93 | 94 |
| Mestre D' Armas | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 |
| Sol Nascente | 81 | 83 | 83 | | 86 |

A extensão da mancha alagada apresenta uma relação de proporcionalidade em relação ao volume de precipitação que é inserido no modelo. Essa relação é expressa pela linha de tendência, indicando uma relação linear positiva entre a mancha alagada máxima e as precipitações de tempo de retorno (Figura 69).

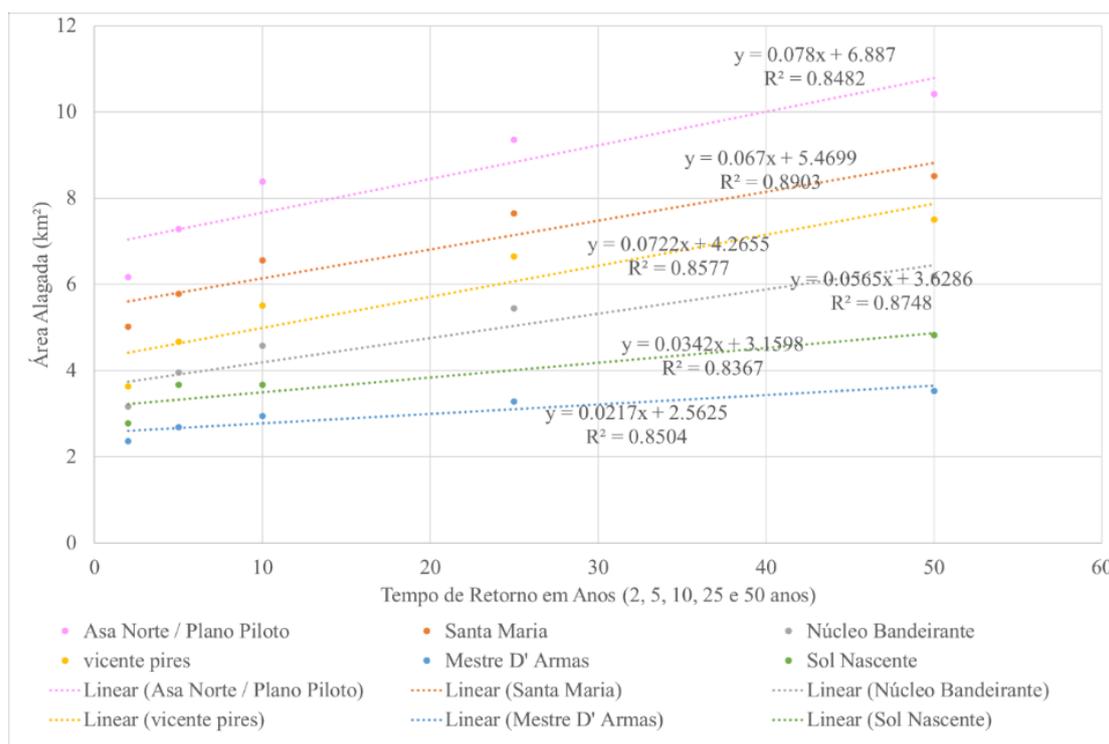


Figura 69 - Gráfico de dispersão das áreas alagadas máximas, com lâmina de água maior que 1 cm (0,01 m). Área de cada bacia urbanas simulada: Asa Norte, Plano Piloto – 24,00 km² / Santa Maria: 18,19 km² / Núcleo Bandeirante: 12,04 km² / Vicente Pires: 12,27 km² / Mestre D' Armas: 7,32 km² / Sol Nascente: 14,24 km².

Contudo, embora a extensão da mancha alagada apresente uma relação linear com as precipitações de tempo de retorno, é oportuno ressaltar que, o incremento do escoamento superficial e da extensão do alagamento, depende de outras variáveis além da precipitação, tais como: o grau de consolidação do sistema de drenagem de águas pluviais e a extensão da área impermeável e permeável da bacia.

Considerando o plano de informação de uso e cobertura do solo relativo ao ano de 2019, com exceção da bacia inserida na Região Administrativa de Vicente Pires, as demais áreas apresentam mais de 40% da sua área permeável (tudo o que não está impermeável), de modo que, a bacia inserida no Núcleo Bandeirantes e na Asa Norte / Plano Piloto, são as áreas com maior percentual de área permeável (Tabela 26).

Tabela 26 - Relação de área ocupada e não ocupada por bacia urbana simulada.

| Áreas | Área da Bacias Urbanas (km ²) | Impermeável (%) | Permeável (%) |
|--------------------------|---|-----------------|---------------|
| Asa Norte / Plano Piloto | 24.00 | 45 | 55 |
| Santa Maria | 18.19 | 54 | 46 |
| Núcleo Bandeirante | 12.04 | 43 | 57 |

| Áreas | Área da Bacias Urbanas (km ²) | Impermeável (%) | Permeável (%) |
|-----------------|---|-----------------|---------------|
| Vicente pires | 12.27 | 66 | 34 |
| Mestre D' Armas | 7.32 | 57 | 43 |
| Sol Nascente | 14.24 | 42 | 58 |

Contudo, cabe ressaltar que algumas bacias, como o caso das áreas inseridas nas Regiões Administrativas de Planaltina (Bacia Mestre D' Armas), no Núcleo Bandeirante e em Vicente Pires, as maiores porções de áreas permeáveis estão associadas a formação florestal, campestre e/ou savânica que ocorrem de forma concentrada ao longo dos córregos (Figura 70).

De modo que, a bacia inserida na Asa Norte na Região Administrativa do Plano Piloto, observa-se uma vegetação campestre integrada aos espaços urbanos e na bacia inserida na Região Administrativa do Pôr do Sol, a maior parcela de área permeável ocorre a oeste da bacia.

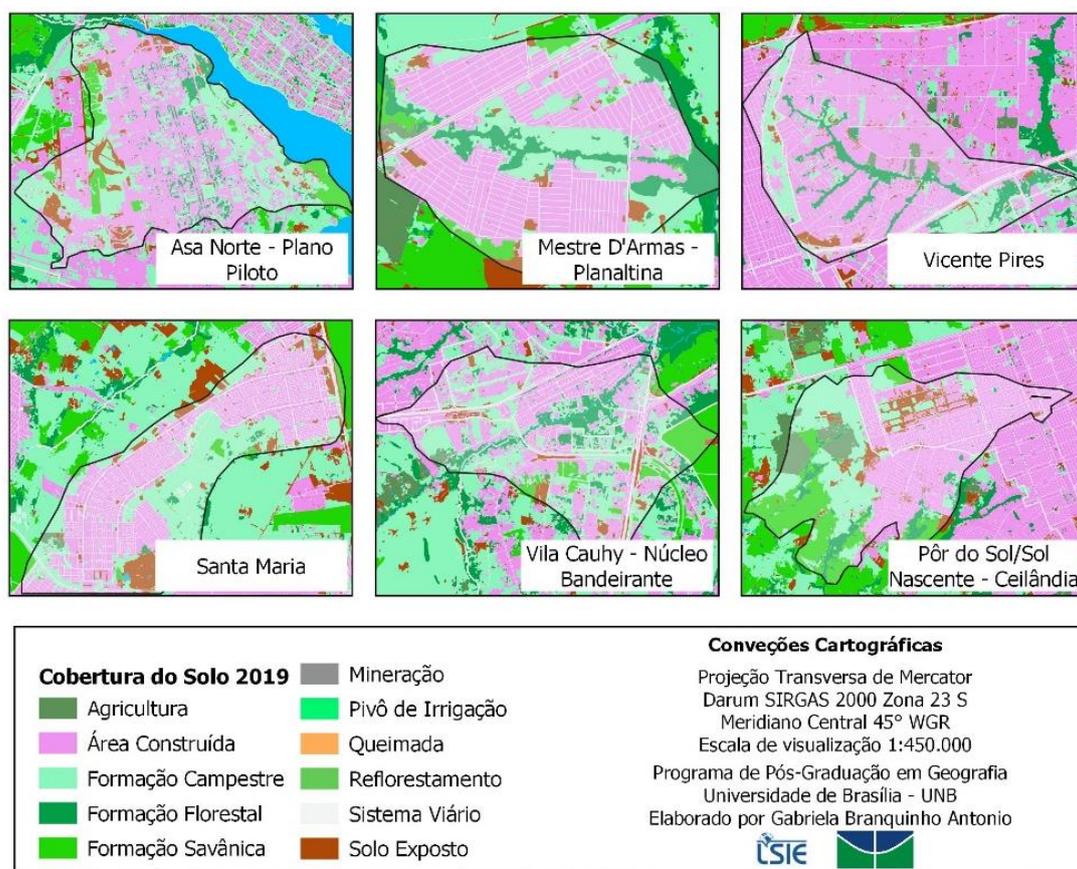


Figura 70 – Localização das áreas de estudo em relação ao uso e cobertura do solo, escala 1:20.000.

Fonte: IDE-DF, 2022

A bacia inserida em Vicente Pires tem uma área impermeável que supera a permeável em 33%, sendo essa bacia, a que apresenta a maior extensão de área alagada máxima em todos os tempos de retorno, chegando a 61% de área alagada máxima diante de uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos.

Cabe ressaltar, dois pontos no que aos tange os alagamentos na bacia simulada em Vicente Pires. A simulação realizada para essa área não considerou o sistema de drenagem de águas pluviais, isso porque, como essa infraestrutura ainda está em processo de implantação, não foi possível ter acesso a esses dados.

Em contrapartida, a Asa Norte no Plano Piloto, compõe o grupo de bacias que apresentam um percentual de área permeável (55%) maior que o de área impermeável (45%). Embora a bacia que apresente o menor percentual de extensão de mancha alagada máxima, em todos os tempos de retorno trabalhados, ela também apresenta o menor percentual de redução de mancha alagada, se comparada as demais áreas que apresentam uma redução que variam entre 75 e 95%.

Embora não tenham sido realizadas simulações com o véis de identificar o impacto do incremento da área impermeável na extensão da mancha alagada e nos demais parâmetros relativos ao alagamento, alguns autores como Gill et al. (2007), Oliveira e Defee (2007), Caputo (2012), Sjoman e Gill (2014), Ren et al. (2020) e Godyn, Muszynski e Grela, (2022), concluem que qualquer avanço de área impermeável, por menor que seja, proporciona um significativo incremento no escoamento superficial e na redução da infiltração.

Nas bacias estudadas, observa-se que os alagamentos ocorrem predominantemente associados as classes de uso e cobertura impermeáveis. Nestas áreas o processo de infiltração é nulo, e toda a precipitação que não é interceptada é convertida em escoamento superficial (PREGNOLATO et. al., 2017).

Dentre as classes impermeáveis mais afetadas, o sistema viário fica extremamente alagado mesmo mediante uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos, sendo possível observar que, mesmo ao final da simulação, uma parcela de escoamento superficial continua acumulada (Figura 71).

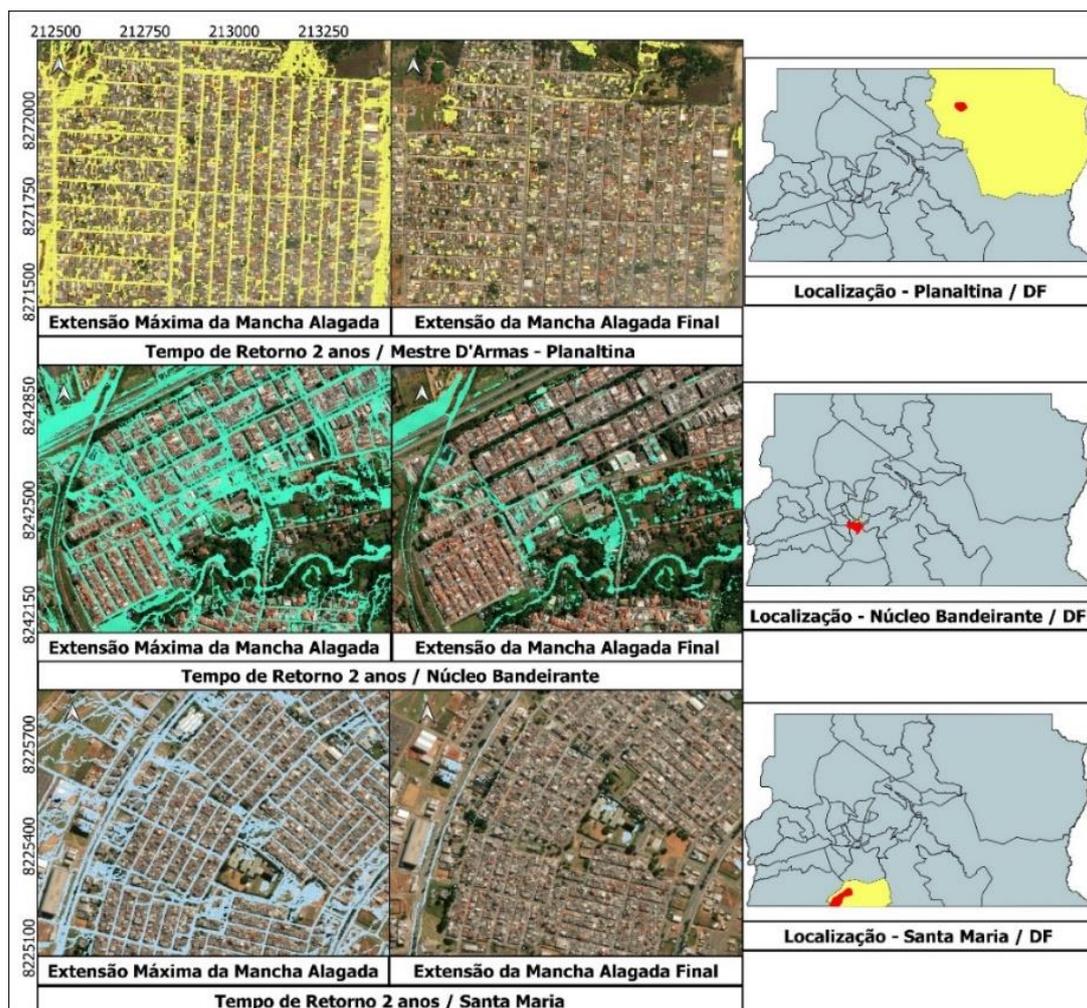


Figura 71 – Diferença entre a Mancha Alagada Máxima e a Mancha Alagada Final

Os alagamentos no sistema viário, trazem diversos impactos negativos na mobilidade urbana e no sistema de transporte. Alguns autores como Department for Transport UK (2014) Affleck e Gibbon (2015), MCdermott et al., (2017) Pyatkovaa et al. (2019), indicam que o principal impacto é referente à atraso nos diversos tipos de modais e/ou interrupção na prestação de serviço de transporte público.

Na Figura 72 e na Figura 73, verifica-se exemplos de alagamento que ocorrem no Distrito Federal. Além do impacto negativo mencionado os alagamentos no sistema viário favorecem a ocorrência de aquaplanagem, acidentes de trânsito e diversos prejuízos econômicos para a população em geral



Figura 72 – Alagamentos em vias de alta circulação de veículos de transporte coletivo (Distrito Federal).

Fonte: Portal de Notícias G1.



Figura 73 – Impactos dos alagamentos no sistema viário (Distrito Federal).

Fonte: Portal de Notícias G1.

Embora o sistema viário seja uma rota preferencial para o transporte e o acúmulo do escoamento superficial, em alguns casos ele pode apresentar um comportamento semelhante ao de canais. Cabe ressaltar que, em todas as simulações, a drenagem de águas pluviais foi considerada, o que deveria evitar o acúmulo de água, especialmente nessas áreas.

Mesmo ao final da simulação (24 horas), alguns trechos mais críticos do sistema viário permanecem alagados. Indicando que o período simulado não é o bastante para que

o sistema absorva o escoamento superficial gerado, possibilitando somente um amortecimento da extensão da mancha alagada (Figura 74).

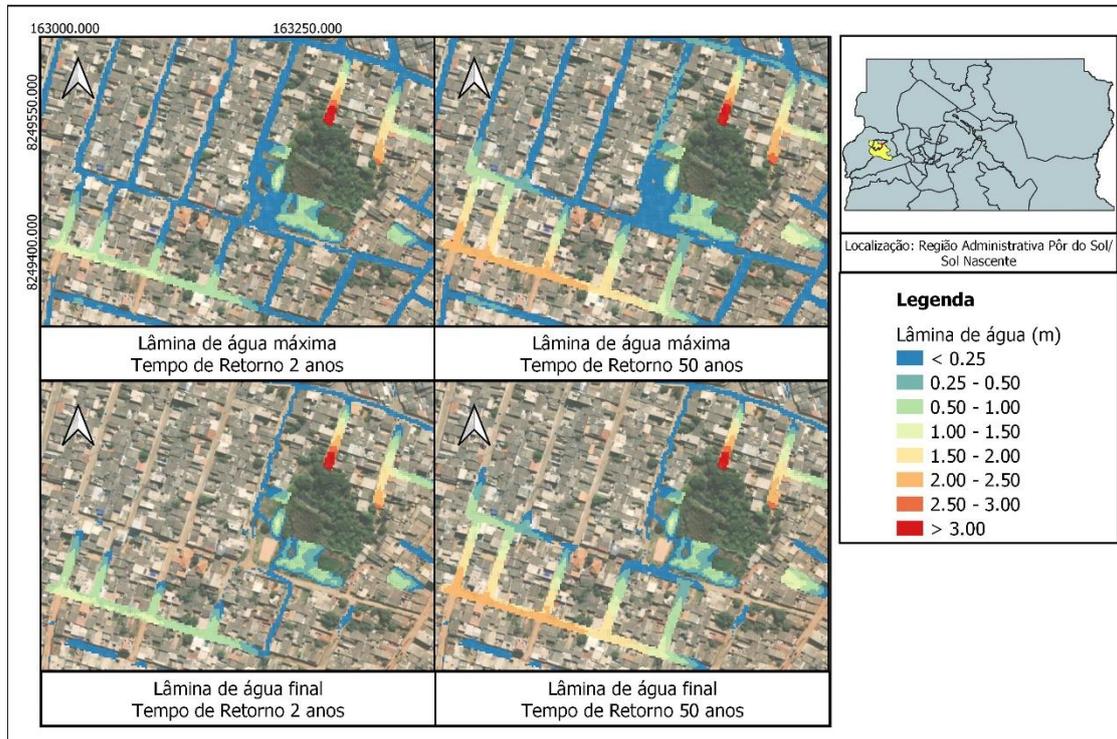


Figura 74 – Exemplo de uma área na Região Administrativa do Pôr do Sol/Sol Nascente. Comparação entre a extensão e a lâmina de água máxima e ao final da simulação, para os tempos de retorno de 2 e 50 anos.

Embora as lâminas de águas mais baixas sejam mais frequentes, em quaisquer uma das precipitações de tempo de retorno simuladas, ainda assim, pode-se constituir como um grande problema para os veículos. De acordo com a Resolução nº 540 de 15 de julho de 2015, a depender do grau de desgaste dos pneus, 8 mm (0,08 cm) de lâmina de água, já pode deflagrar aquaplanagem (FELEX, 2019), podendo esse risco se incrementado a depender da qualidade do material asfáltico.

Embora a lâmina de água média seja baixa em todas as bacias simuladas (os mapas com as lâminas de água máximas podem ser consultados nos apêndices¹), na Asa Norte, nas “tesourinhas”, observasse um grande acúmulo de água, devido a morfologia do terreno nessas áreas que favorecessem naturalmente a permanência do escoamento superficial, notasse também a ocorrência de lâminas de água mais elevadas (Figura 75).

¹ APÊNDICE B: Altura da lâmina de água máxima (m) – ASA NORTE / PLANO PILOTO - DF; APÊNDICE C: Santa Maria no entorno da Via Alagados – Lâmina de Água MÁXIMA (m); APÊNDICE D: Planaltina, ARIS Mestre D’Armas I – Lâmina de Água Máxima (m); APÊNDICE E: Vicente Pires, ARINE Vicente Pires – Lâmina de Água MÁXIMA (m); APÊNDICE F: Núcleo Bandeirante, ARIS Vila Cauhy – Lâmina de Água LIMA (m); e, APÊNDICE G: Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – Lâmina de Água Máxima (m).

As características do alagamento podem afetar a estabilidade dos veículos, causando não somente aquaplanagem, mais deixando os veículos à deriva (DONG et. al., 2022).

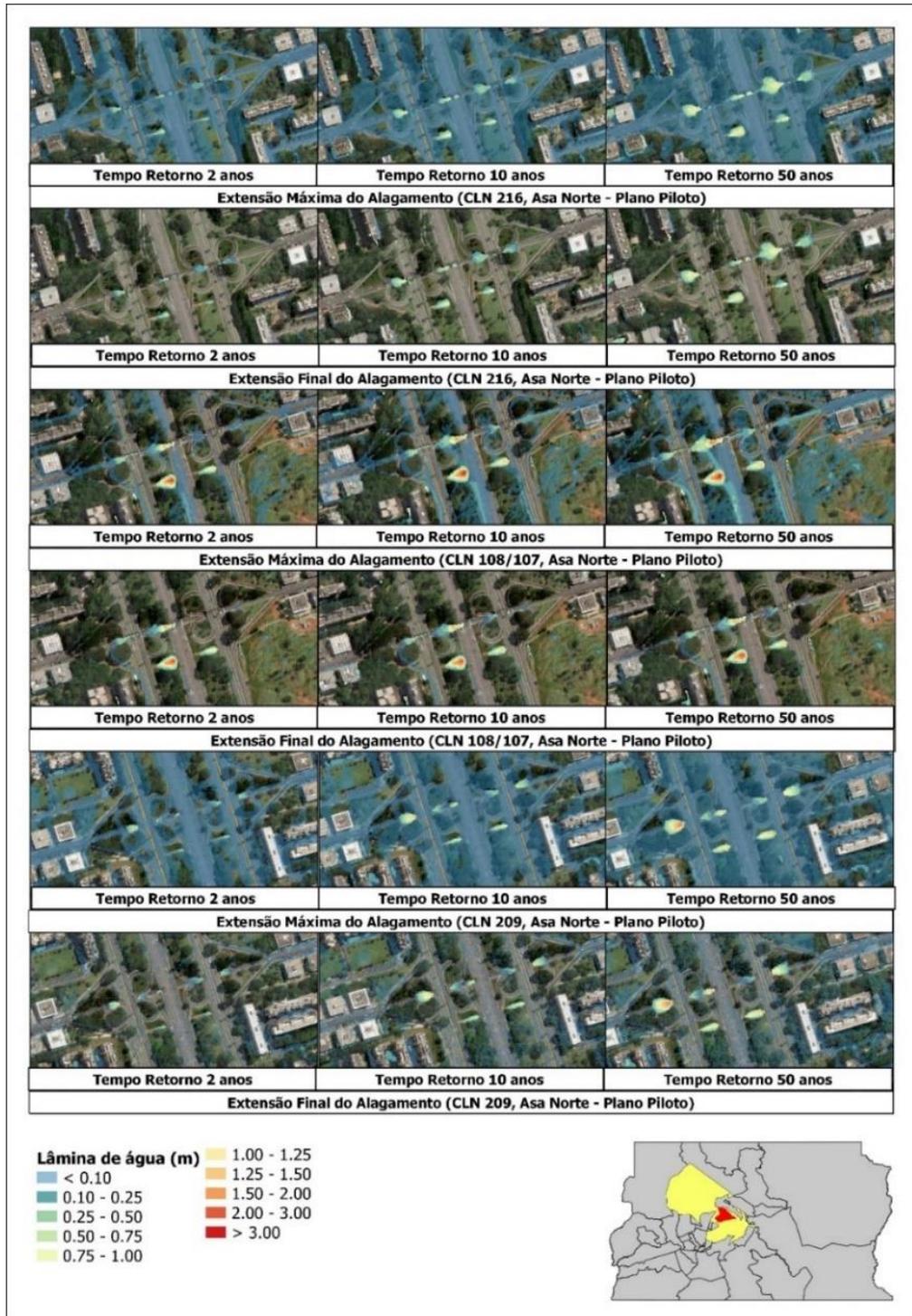


Figura 75 – Lâmina de água máxima e ao final da simulação, para a região das “tesourinhas”, na Asa Norte – Plano Piloto, DF.

Norte – Plano Piloto, DF.

De maneira geral, a deflagração de alagamentos com precipitações de tempo de retorno de 2 anos, independente da classe de uso e cobertura do solo é extremamente preocupante, considerando que a micro e macrodrenagem são dimensionadas para suportar precipitações iguais ou maiores a mencionada (PDDU-DF, 2009).

Na Figura 76, observe-se que nos mesmos trechos apresentados na Figura 75, são observadas velocidades mais intensas, as quais variam de 0,1 a 1,0 m/s (os mapas com as velocidades máximas podem ser consultados nos apêndices²).

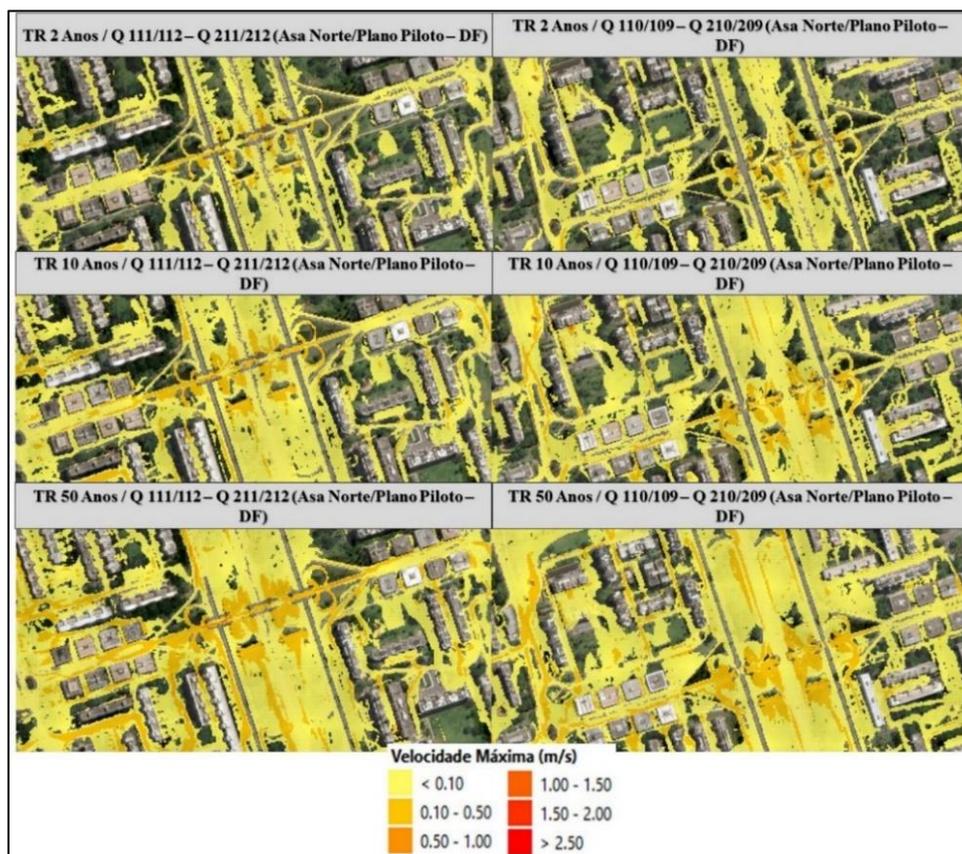


Figura 76 - Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s), na sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Alguns autores como Garcia et al. (2003), discutem que a interação entre a altura das lâminas de água e das velocidades do escoamento superficial, apresentam um indicativo da intensidade do alagamento, quanto maior a lâmina de água e maior a velocidade, mais intenso será o evento de alagamento.

² APÊNDICE H: ASA NORTE, PLANO PILOTO, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s); APÊNDICE I: SANTA MARIA, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s); APÊNDICE J: PLANALTINA, ARIS MESRE D' ARMAS I, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s); APÊNDICE L: VICENTE PIRES, ARINE VICENTE PIRES, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s); APÊNDICE M: NÚCLEO BANDEIRANTES, ARIS VILA CAUHY, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S); E, APÊNDICE N: PÔR DO SOL/SOL NASCENTE, Velocidade máxima do escoamento superficial (m/s)

De acordo Miguez et al. (2018), algumas intensidades teriam potencial de arrastar determinados objetos e/ou pessoas, expondo a população a um perigo potencial, principalmente em áreas de vulnerabilidade social. Além disso, a permanência desse fluxo em superfície pode desencadear problemas estruturais nas edificações.

Na Figura 77, Figura 78 e Figura 79, são observadas as lâminas de água que ocorrem em algumas áreas de regularização de interesse social, respectivamente ARIS da Vila Cauhy (Núcleo Bandeirante), ARIS Ribeirão (Santa Maria) e ARIS Nova Gênese (Pôr do Sol/Sol Nascente).

Nas áreas das ARIS, observe-se o sistema viário alagado com lâminas de água que variam de 1 a 25 cm de altura, nas simulações de precipitação de tempo de retorno de 2 anos. Nas simulações utilizando precipitação de tempo de retorno de 50 anos, observa-se além do incremento da mancha, um incremento nas alturas da lâmina de água.

Na ARIS da Vila Cauhy (Figura 77), são observadas em algumas ruas lâminas de água mais elevadas, em um trecho da poligonal que ainda não está ocupado e que recebe contribuição do escoamento superficial produzido no trevo da DF-450 (EPEIA) que dá acesso à região, no qual são observadas alturas de lâmina de água que variam de 25 a 75 cm.

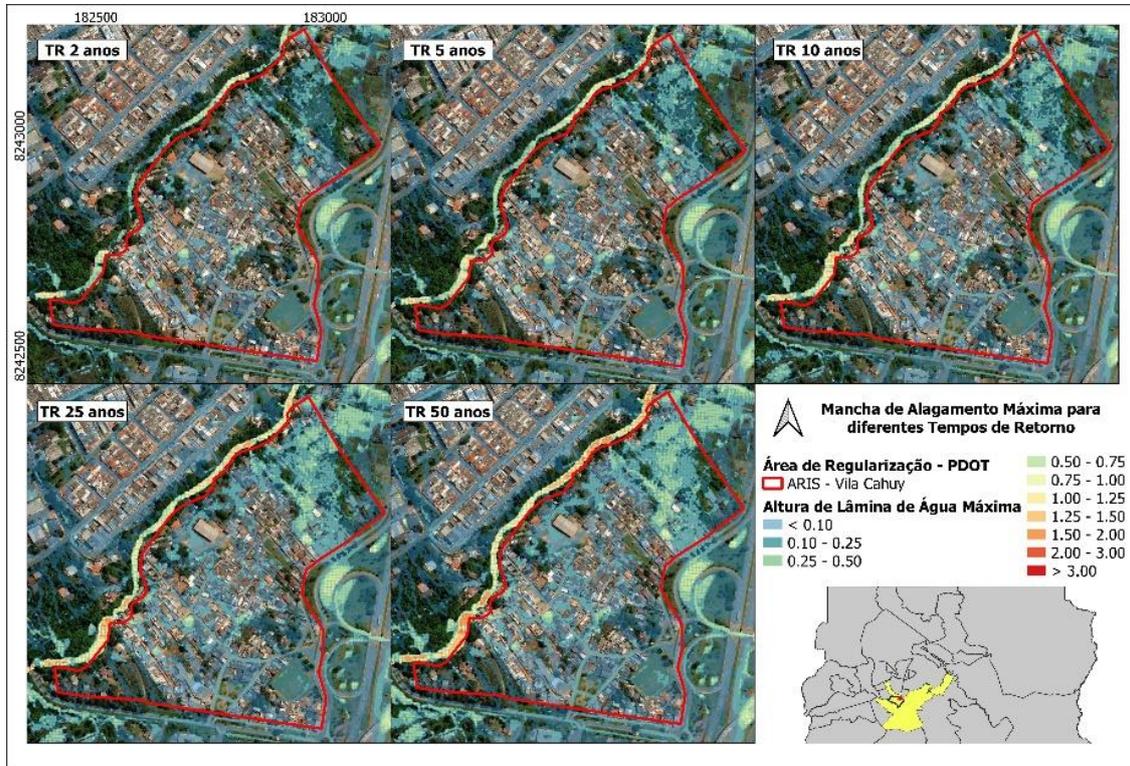


Figura 77 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante, DF.

Na ARIS Ribeirão (Figura 78), observa-se que quase todo o sistema viário da ARIS fica alagado, mesmo que com alturas menores, em todas as simulações com tempo de retorno de anos.



Figura 78 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Ribeirão, Santa Maria, DF.

Na ARIS Nova Gênese (Figura 79), observasse que em toda a sua extensão encontra-se densamente ocupada, fazendo com o alagamento se concentre nas vias, produzindo incremento nas lâminas de água à medida que precipitações mais intensas são simuladas.

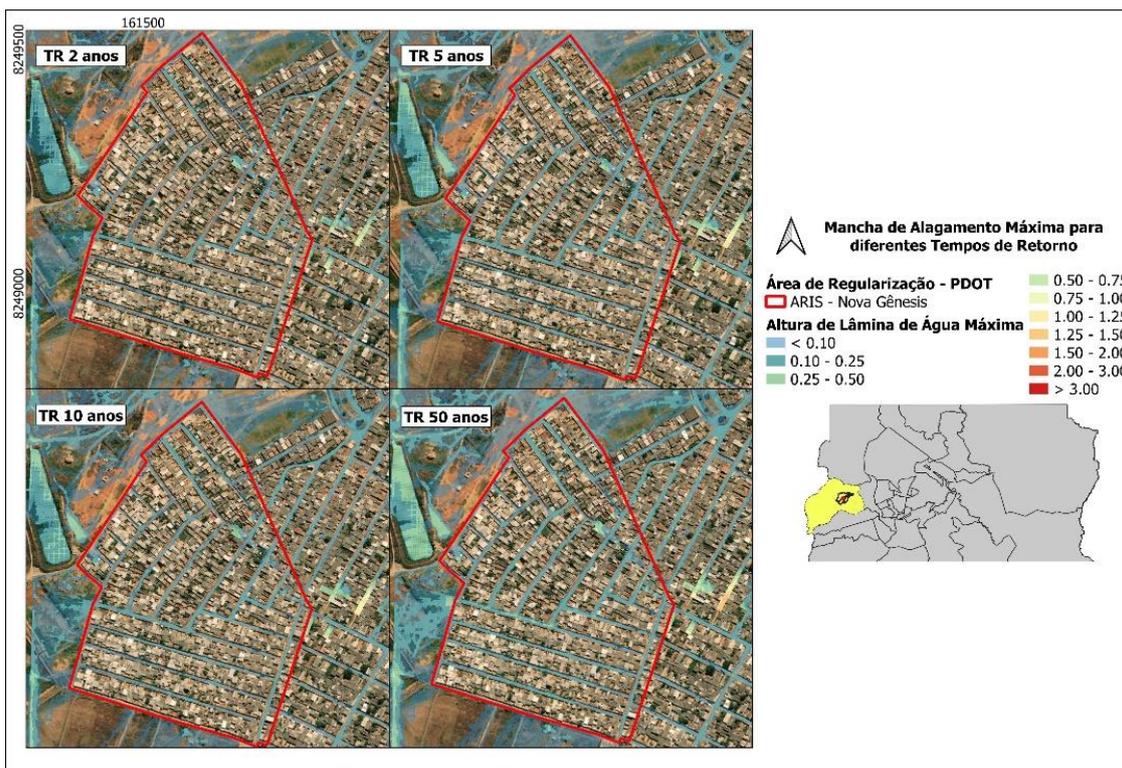


Figura 79 - Lâmina de água máxima (m) na ARIS Nova Gênesis, Pôr do Sol/Sol Nascente, DF.

Na Tabela 27, tem-se o resumo da porcentagem das extensões de área alagada das ARIS apresentadas acima, considerando a área que ainda não foi edificada.

Tabela 27 - Resumo das extensões da mancha de alagamento das áreas de regularização ARIS da Vila Cauhy (Núcleo Bandeirante), ARIS Ribeirão (Santa Maria) e ARIS Nova Gênesis (Pôr do Sol/Sol Nascente).

| ARIS/ ARINE | Área (km ²) | Área Não edificada até 2016 | Área edificada até 2016 | Extensão da Mancha Alagada em (%) | | | | |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 |
| ARIS - Vila Cahuy | 0,26 | 0,19 | 0,07 | 56,55 | 65,83 | 72,77 | 81,90 | 88,54 |
| ARIS - Ribeirão | 0,89 | 0,62 | 0,27 | 22,43 | 25,86 | 29,61 | 35,59 | 42,29 |
| ARIS - Nova Gênesis | 0,21 | 0,15 | 0,06 | 26,64 | 30,26 | 30,26 | 0,00 | 33,62 |

O Serviço Geológico Brasileiro (SGB, 2023) está produzindo um mapeamento de Setorização de Risco. Nesse trabalho, duas dessas áreas de risco ocorrem em bacias simuladas, sendo elas: a bacia localizada na Região Administrativa do Núcleo Bandeirante, onde o setor de risco ocorre dentro da ARIS Vila Cauhy, e a outra bacia está localizada na Região Administrativa do Pôr do Sol. O setor de risco que ocorre dentro da ARIS Vila Cauhy, está associado a processos de inundações e enchentes, que podem ser

intensificados em virtude da contribuição do escoamento superficial produzido na planície de inundação.

De acordo com a Setorização de Risco elaborada pelo Serviço Geológico Brasileiro, foram identificados diversos imóveis em risco, sendo o grau de risco desse setor, Alto (consultar relatório da setorização de risco, pelo qr code dos mapas abaixo, para mais detalhes).

Nesse setor de risco, ocorrem lâminas de água que chegam a 0,75 m na varzea e até 2,0 m dentro do córrego, com relação a velocidade do escoamento, na varzea como no córrego ocorrem pequenos pixels que variam de 1,0 m/s a 2,0 m/s (Figura 80 e Figura 81)

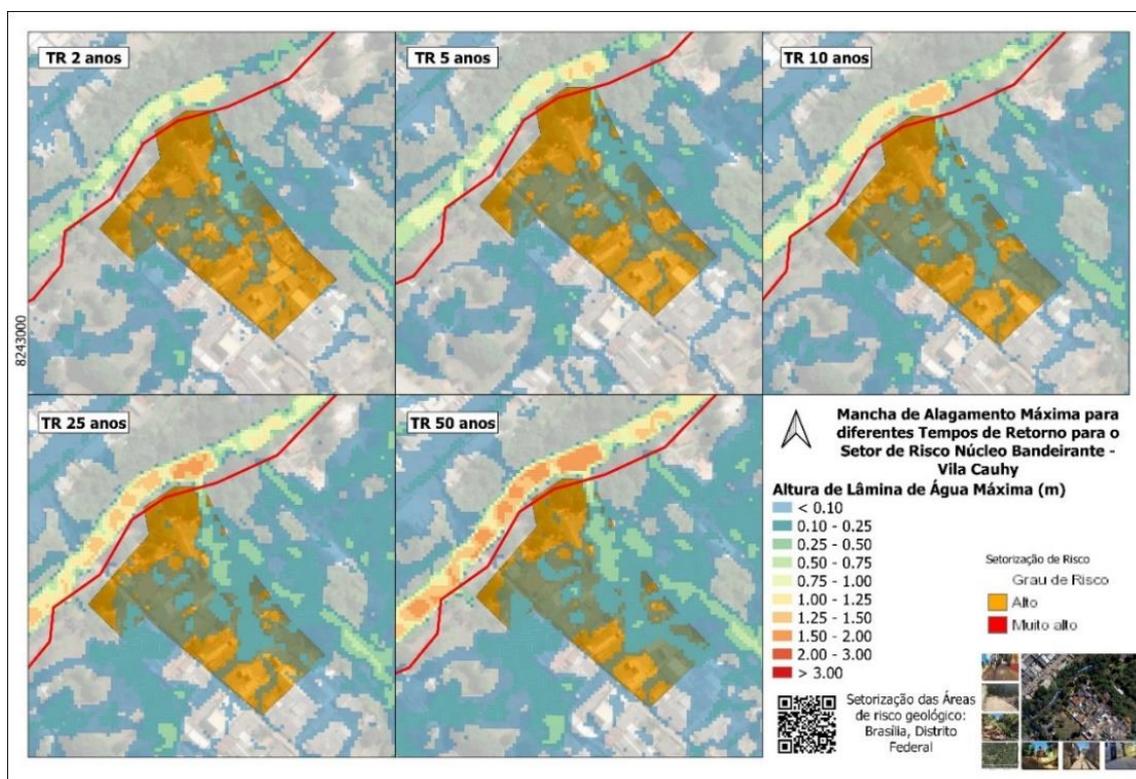


Figura 80 - Mapa de altura de lâmina de água máxima (m), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante.

Fonte: Setorização de Risco, Serviço Geológico Brasileiro (2023)
<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22910>.

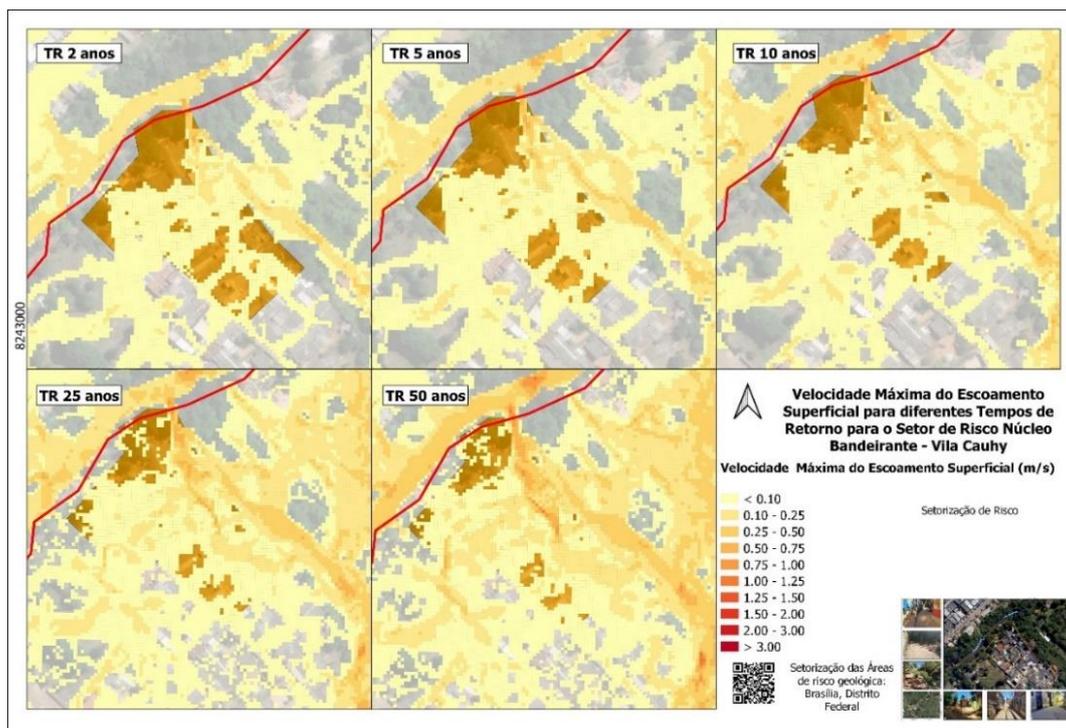


Figura 81 - Mapa de velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante.

Fonte: Setorização de Risco, Serviço Geológico Brasileiro (2023), <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22910>.

O Setor de Risco que ocorre dentro da bacia inserida na Região Administrativa do Pôr do Sol, elaborado pelo Serviço Geológico Brasileiro, identificou 42 imóveis em risco e 168 pessoas em risco, sendo esse setor classificado como alto risco de enxurrada e Voçoroca, que podem ser agravadas em virtude do escoamento superficial.

Na Figura 82, observa-se que ocorrem lâminas de água maiores que 1,25 m e velocidades maiores que 0,50 m/s (Figura 83), mesmo no cenário de precipitação de tempo de retorno de 2 anos, indicando nessa região um alagamento mais intenso.

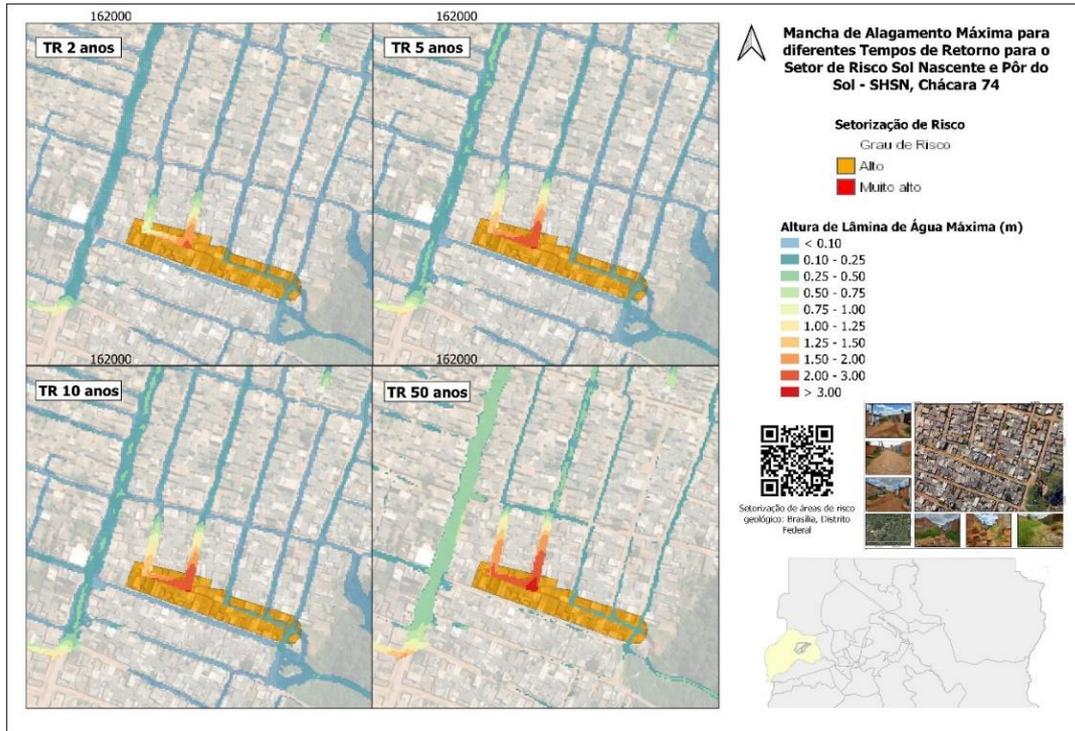


Figura 82 – Mapa de altura de lâmina de água máxima (m), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Sol Nascente e Pôr do Sol SHSN, chácara 74.

Fonte: Setorização de Risco, Serviço Geológico Brasileiro (2023), <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22910>.

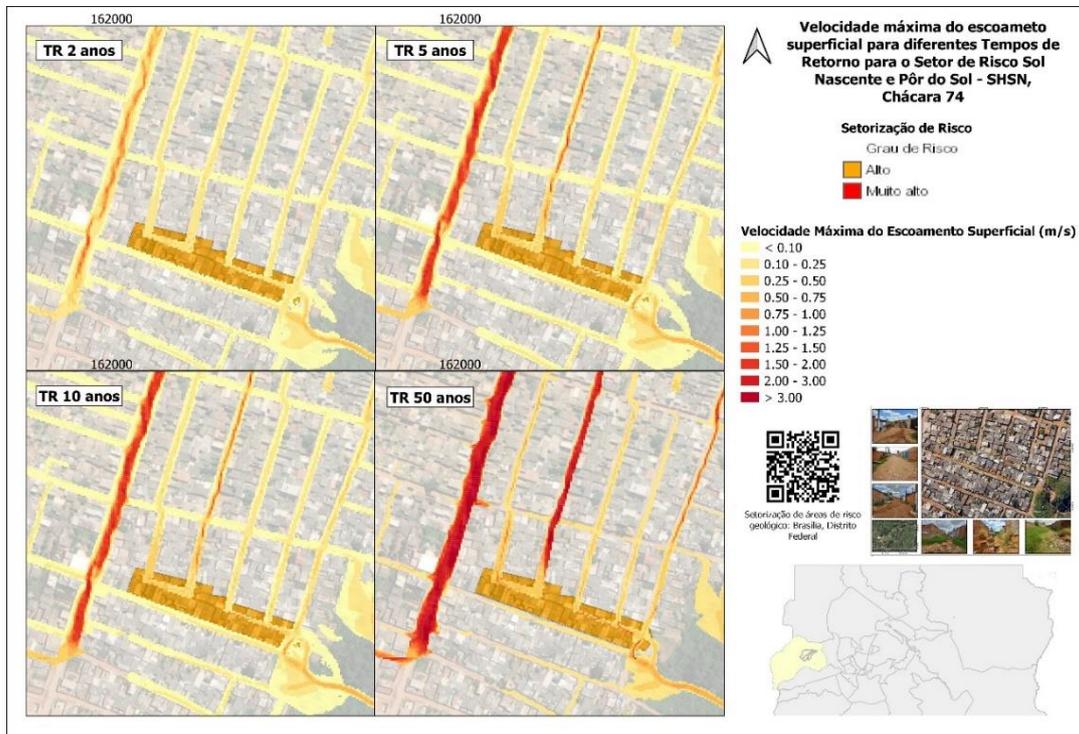


Figura 83 - Mapa de velocidade máxima do escoamento superficial (m/s), para precipitações de diferentes tempos de retorno no setor de risco Sol Nascente e Pôr do Sol SHSN, chácara 74.

Fonte: Setorização de Risco, Serviço Geológico Brasileiro (2023), <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22910>.

Yang et al. (2020), Hassan et al. (2022), discutem que a falta de planejamento longo prazo, aplicado ao dimensionamento do sistema de drenagem de águas pluviais, pode causar o subdimensionamento da rede. Deste modo, com o contínuo crescimento da cidade e novos usos que vão surgindo, isto pode ocasionar a ocorrência de alagamentos mesmo com precipitações pouco intensas, em áreas com sistemas de drenagem de águas pluviais.

Além disso, cabe ressaltar que a falta de fiscalização na obra propicia que haja subdimensionamento da rede de drenagem, possibilitando que a rede implantada tenha diâmetro menor ao que foi dimensionado em projeto.

Nas simulações realizadas neste trabalho, cabe ressaltar que a rede de drenagem de águas pluviais foi considerada como um componente do modelo. Dessa forma, em todos os casos, foi considerado o pleno funcionamento da rede. O que deveria contribuir para minimizar os alagamentos. Ao todo, foi simulado aproximadamente 373788 m de rede coletora de águas pluviais, na Tabela 28 é apresentado um resumo por área de estudo.

Tabela 28 – Resumo da extensão da rede coletora de águas pluviais, da quantidade de *junctions* e de *Outlet*.

| Área de estudo | Extensão da rede coletora (m) | <i>Junctions</i> (boca de lobo + poço de visita) | <i>Outlet</i> (Saída) |
|-------------------------|-------------------------------|--|-----------------------|
| Mestre D' Armas | 22485 | 497 | 3 |
| Núcleo Bandeirante | 27698 | 920 | 19 |
| Pôr do Sol/Sol Nascente | 23457 | 733 | 14 |
| Santa Maria | 86963 | 3393 | 14 |
| Asa Norte | 213182 | 7953 | 75 |

Em todas as bacias hidrográficas simuladas, foi observado que o diâmetro da rede de drenagem de águas pluviais mais frequente é de 400 mm (0,4 m), que de acordo com o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal está associado a diâmetros que compõe a microdrenagem (Figura 84).

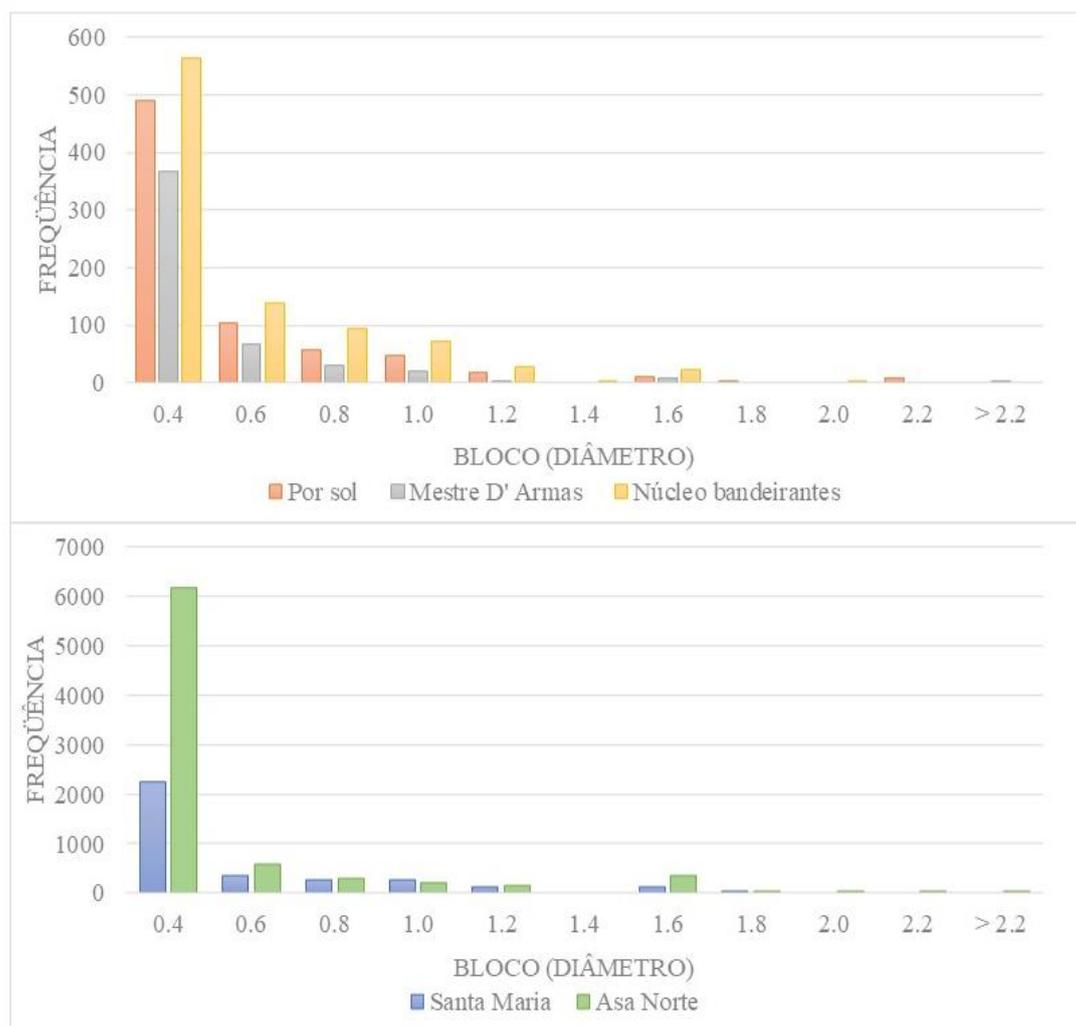


Figura 84 - Histograma de Frequência dos diâmetros da rede coletora da bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Em todas as áreas simuladas (Tabela 29), observa-se a quantidade de nós sobrecarregados, sem que haja um extravasamento total ou o retorno do volume excedente à superfície, a quantidade de nós afetados não ultrapassa 50% do total da rede.

Contudo, a quantidade de nós que ficam completamente inundados, com extravasamento do volume excedente a superfície em relação aos nós que ficam sobrecarregados é maior na Bacia Hidrográfica Mestre D' Armas e Bacia Hidrográfica Pôr do sol, que de acordo com o PDSB-DF, possuem o sistema de drenagem de águas pluviais parcialmente implantado até 2008, de modo que, parte da bacia do Pôr do sol apresentam um sistema ainda não implantado. No APÊNDICE O: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS SOBRECARREGADOS e no APÊNDICE P: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS INUNDADOS, podem ser

consultados os mapas com os nós sobrecarregados e inundados de cada bacia hidrográfica estuda.

Tabela 29 – Resumo da quantidade de nós sobrecarregados e inundados nas bacias hidrográficas simuladas

| Bacia Hidrográfica Mestre D' Armas¹ | | | | | |
|--|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| TR | Sobrecarregado | | Inundado | | |
| | Total | Nós sobrecarregados (%) | Total | Relação ao total de nós (%) | Relação ao total de nós sobrecarregados (%) |
| 2 | 85 | 17 | 61 | 12 | 72 |
| 5 | 101 | 20 | 73 | 15 | 72 |
| 10 | 113 | 23 | 83 | 17 | 73 |
| 25 | 132 | 26 | 99 | 20 | 75 |
| 50 | 143 | 29 | 99 | 20 | 69 |
| Bacia Hidrográfica Núcleo Bandeirante² | | | | | |
| TR | Sobrecarregado | | Inundado | | |
| | Total | Nós sobrecarregados (%) | Total | Relação ao total de nós (%) | Relação ao total de nós sobrecarregados (%) |
| 2 | 255 | 28 | 76 | 8 | 30 |
| 5 | 263 | 29 | 91 | 10 | 35 |
| 10 | 278 | 30 | 101 | 11 | 36 |
| 25 | 304 | 33 | 131 | 14 | 43 |
| 50 | 329 | 36 | 144 | 16 | 44 |
| Bacia Hidrográfica Pôr do sol³ | | | | | |
| TR | Sobrecarregado | | Inundado | | |
| | Total | Nós sobrecarregados (%) | Total | Relação ao total de nós (%) | Relação ao total de nós sobrecarregados (%) |
| 2 | 97 | 13 | 51 | 7 | 53 |
| 5 | 128 | 17 | 74 | 10 | 58 |
| 10 | 128 | 17 | 73 | 10 | 57 |
| 50 | 181 | 25 | 110 | 15 | 61 |
| Bacia Hidrográfica Santa Maria⁴ | | | | | |
| TR | Sobrecarregado | | Inundado | | |
| | Total | Nós sobrecarregados (%) | Total | Relação ao total de nós (%) | Relação ao total de nós sobrecarregados (%) |
| 2 | 135 | 4 | 50 | 1 | 37 |
| 5 | 163 | 5 | 61 | 2 | 37 |
| 10 | 182 | 5 | 65 | 2 | 36 |
| 25 | 210 | 6 | 75 | 2 | 36 |
| 50 | 211 | 6 | 77 | 2 | 36 |
| Bacia Hidrográfica Asa Norte⁵ | | | | | |
| TR | Total | | Nós sobrecarregados | | |

| | Total | Nós sobrecarregados (%) | Total | Relação ao total de nós (%) | Relação ao total de nós sobrecarregados (%) |
|-----------|-------|-------------------------|-------|-----------------------------|---|
| 2 | 2006 | 25 | 162 | 2 | 8 |
| 5 | 2119 | 27 | 218 | 3 | 10 |
| 10 | 2266 | 28 | 318 | 4 | 14 |
| 25 | 2500 | 31 | 499 | 6 | 20 |
| 50 | 2697 | 34 | 690 | 9 | 26 |

Quantidade de nós em cada bacia: ¹500; ²920; ³732; ⁴3393; e ⁵7953

Na Figura 85, é apresentada a relação entre os nós sobrecarregados e inundados em relação a extensão da mancha alagada. Observa-se que o incremento da área total alagada acompanha o incremento dos nós sobrecarregados e inundados em todas as bacias estudadas.

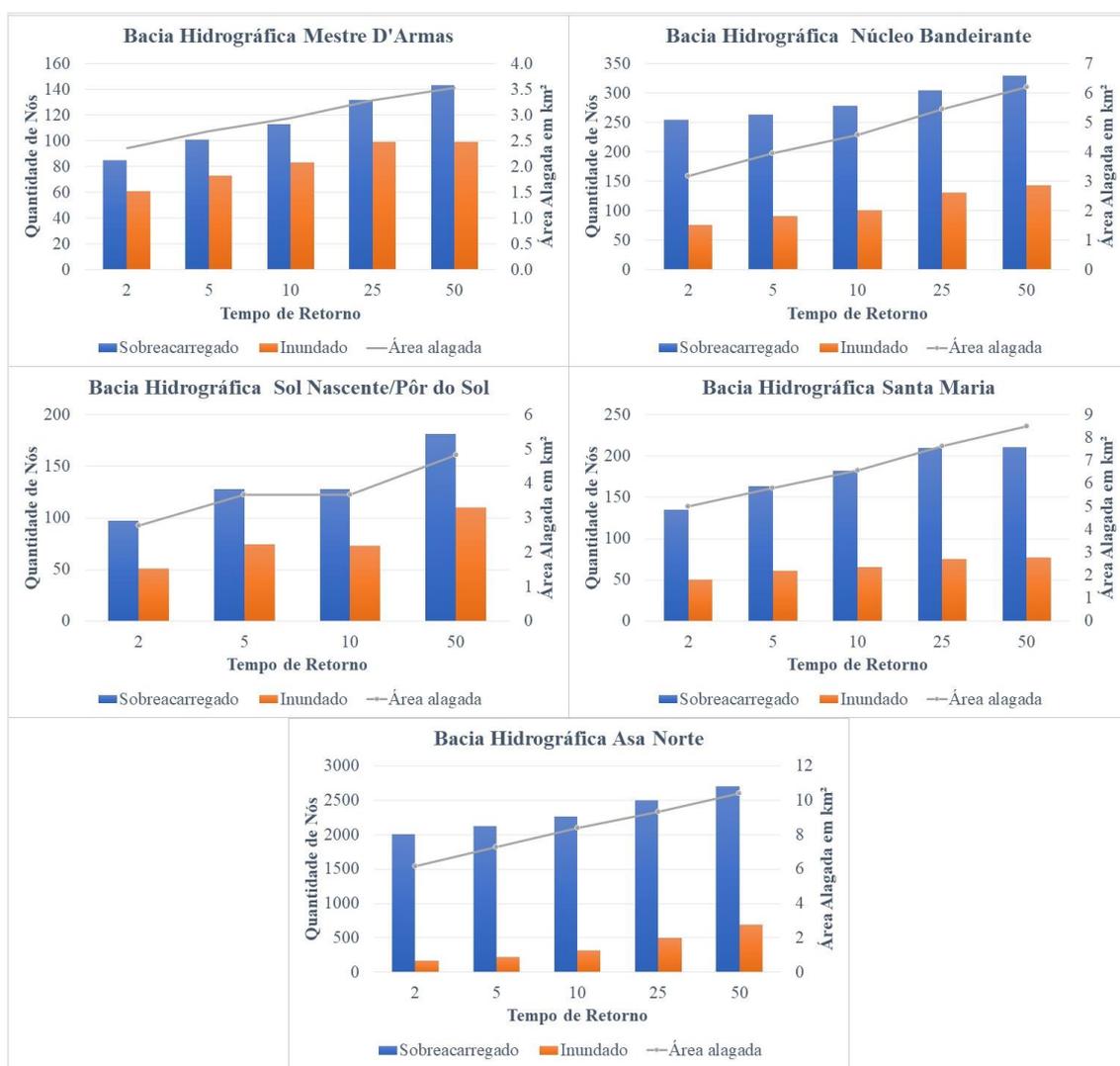


Figura 85 – Relação da quantidade de nós sobrecarregados e inundados com a extensão da mancha alagada.

Cabe ressaltar que, embora a sobrecarga da rede não seja um problema tão severo quanto a sua “inundação”, ainda assim, contribuí para a permanência do volume excedente por mais tempo em superfície, considerando que, enquanto a rede está sobrecarregada, a sua capacidade de “absorção” é impactada. Além disso, pode gerar sobrecarga em outros trechos da rede, que irá receber a contribuição do volume excedente que está escoando.

Em áreas que apresentam grande volume de acúmulo de água, como em frente ao ICC na Universidade de Brasília - UNB (Asa Norte - Plano Piloto), observa-se mais nós sobrecarregados a partir de tempo de retorno de 5 anos (Figura 86).

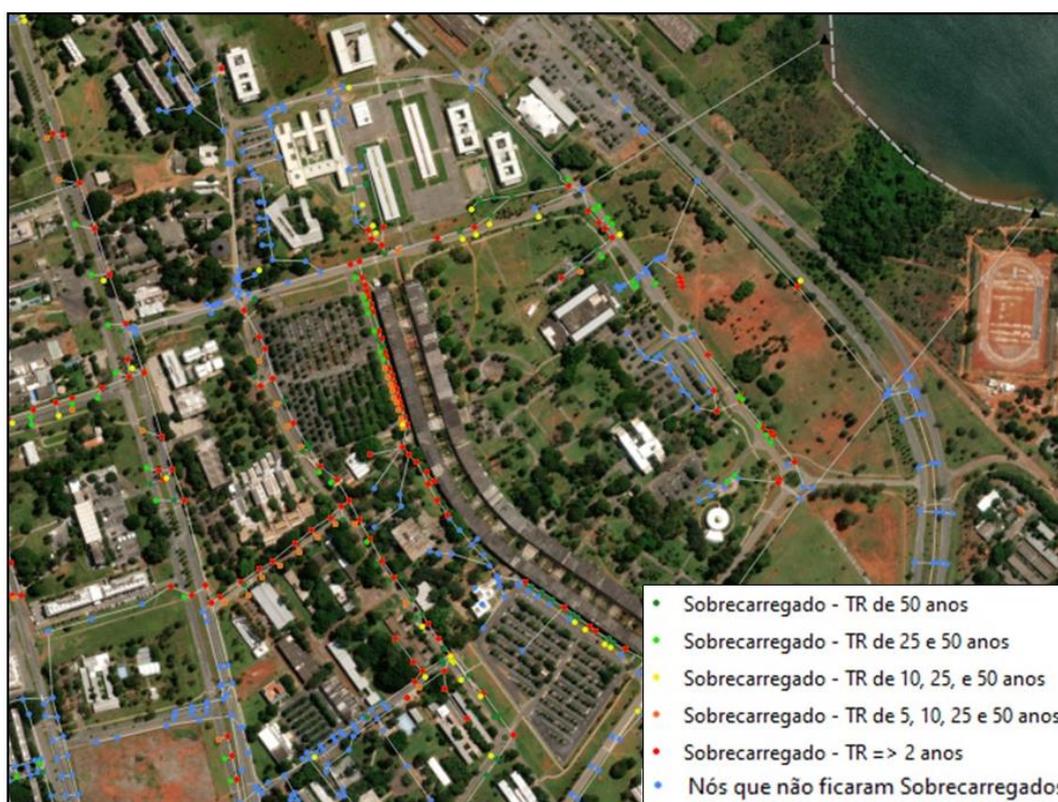


Figura 86 – Localização dos nós que ficaram sobrecarregados no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Contudo, dos nós que ficaram sobrecarregados (em todos os tempos de retorno), poucos são os que efetivamente ficaram completamente inundados, como é possível observar na Figura 87, indicando que, embora a rede apresente significativa sobrecarga durante a precipitação, parte considerável dos nós consegue estabilizar e normalizar, explicando a redução das áreas alagadas ao final da simulação.



Figura 87 – Localização dos nós que ficaram inundados no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Considerando o exposto acima, serão apresentados a seguir perfis da rede de drenagem de águas pluviais de dois trechos, sendo o primeiro (Figura 88) na porção norte do Instituto Central de Ciências - ICC e o segundo trecho (Figura 89), relativo a via lateral ao Instituto Central de Ciências – ICC (porção norte).

No primeiro trecho (Figura 88), observamos que no pico da precipitação de tempo de retorno de 50 anos, todos os nós que ficam sobrecarregados também ficam inundados, com exceção de um nó.

Com relação ao segundo trecho (Figura 89), o trecho da rede em que ocorre inundação recebe contribuições de outros trechos da rede, além do escoamento superficial.

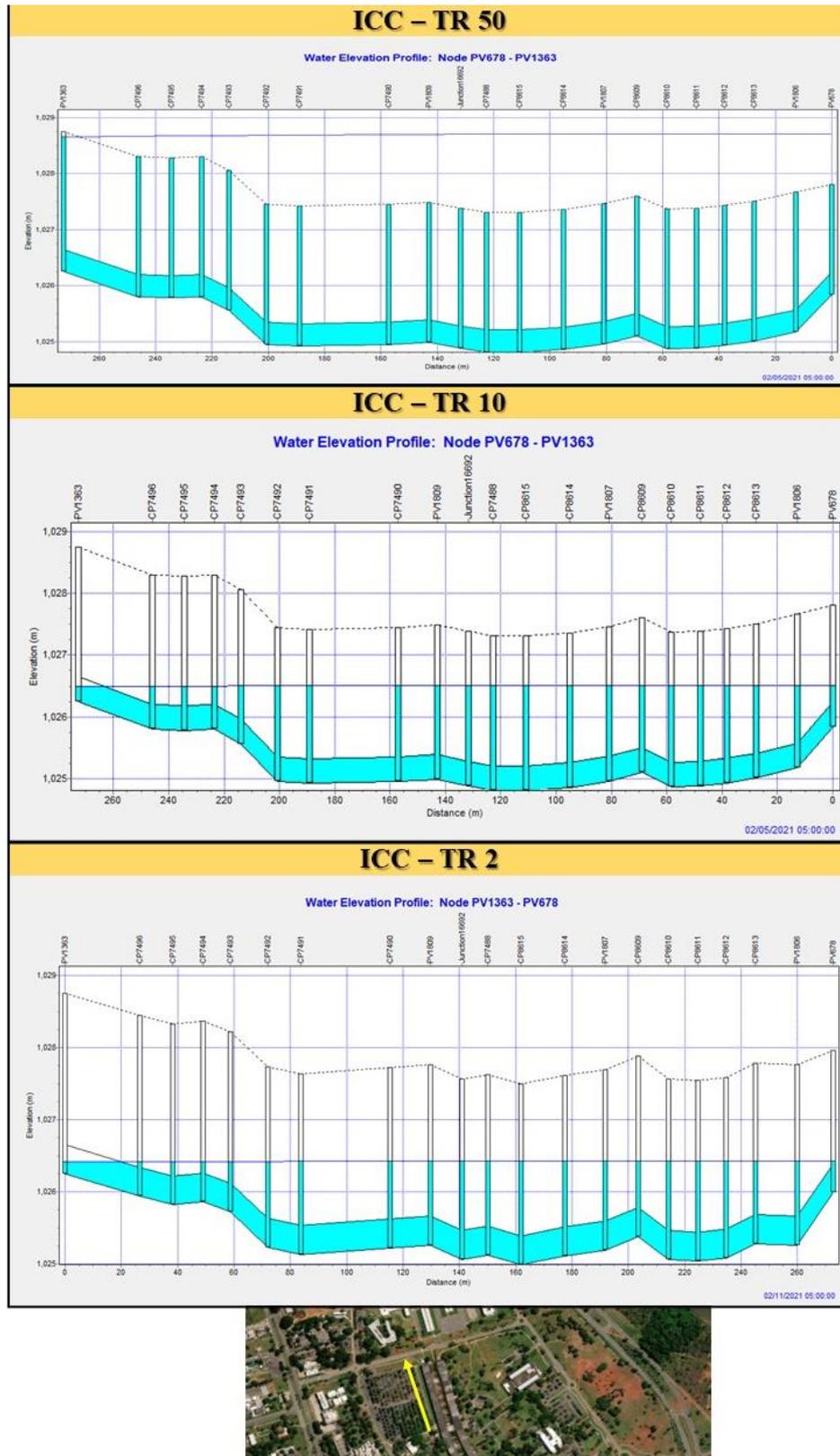


Figura 88 – Perfil 1 transversal e longitudinal da rede - localizado na frente do ICC Norte (SWMM/FLO2D), no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF.

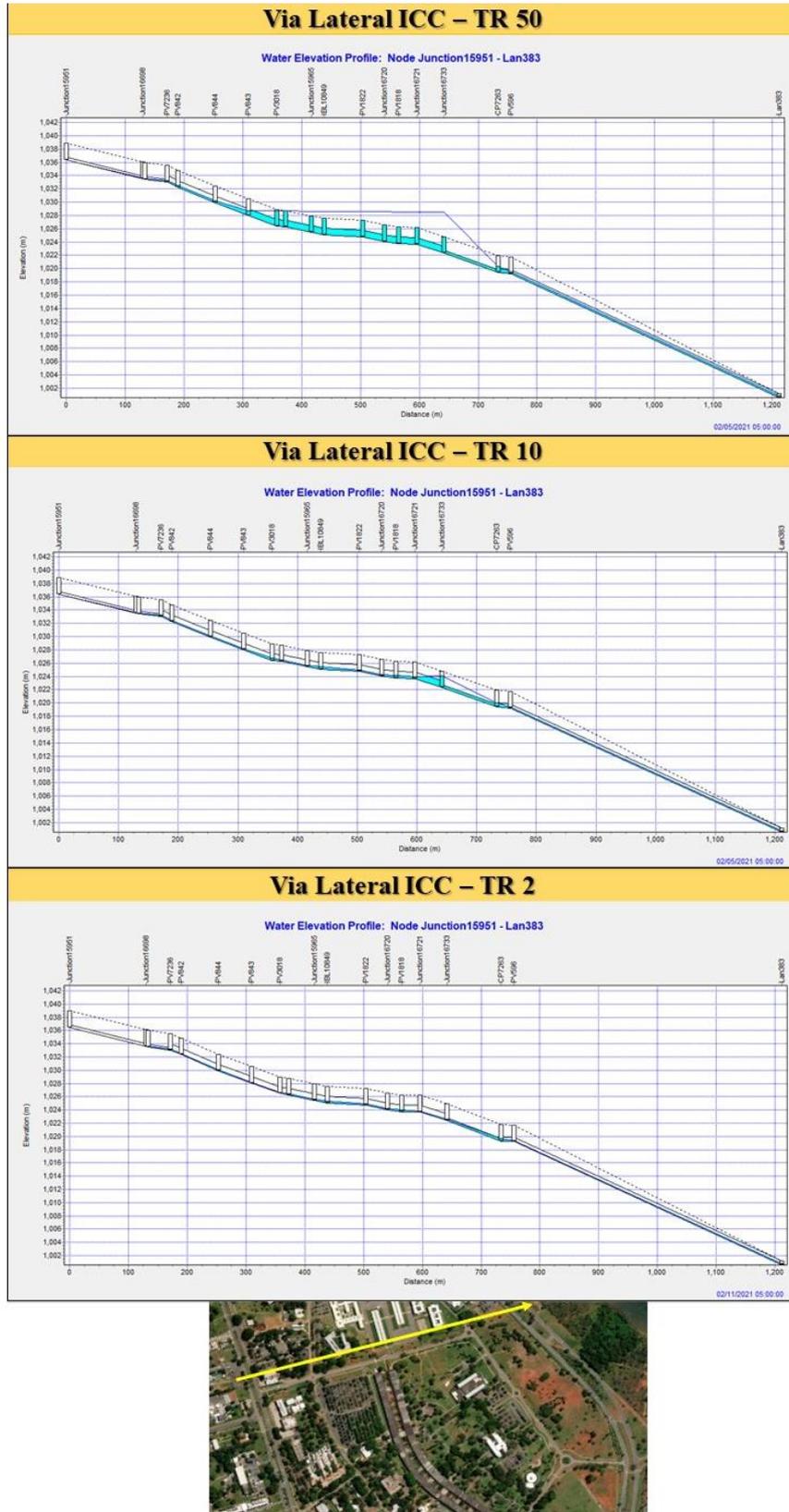


Figura 89 - Perfil transversal e longitudinal da rede 2 / SWMM/FLO2D - via lateral do ICC Norte, no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF.

Em alguns trechos, que comumente alagam, observe-se que o volume de escoamento superficial é grande o suficiente para que o sistema de drenagem não consiga transportar na velocidade necessária o volume que é coletado pela boca de lobo, antes que se formem os acúmulos de água.

Um exemplo disso, é área em frente ao Prédio do ICC na Universidade de Brasília (Asa Norte – Plano Piloto). Como pode ser observado na Figura 90, nessa área existe a probabilidade de ocorrerem lâminas de água que podem chegar até 1,5 m quando em uma precipitação de 50 anos de tempo de retorno.

Essa região, além de ter uma topografia favorável ao acúmulo de água, ainda recebe como contribuição todo o escoamento superficial do estacionamento. Verifica-se ainda que, mesmo ao término da simulação, ainda há um volume significativo acumulado.

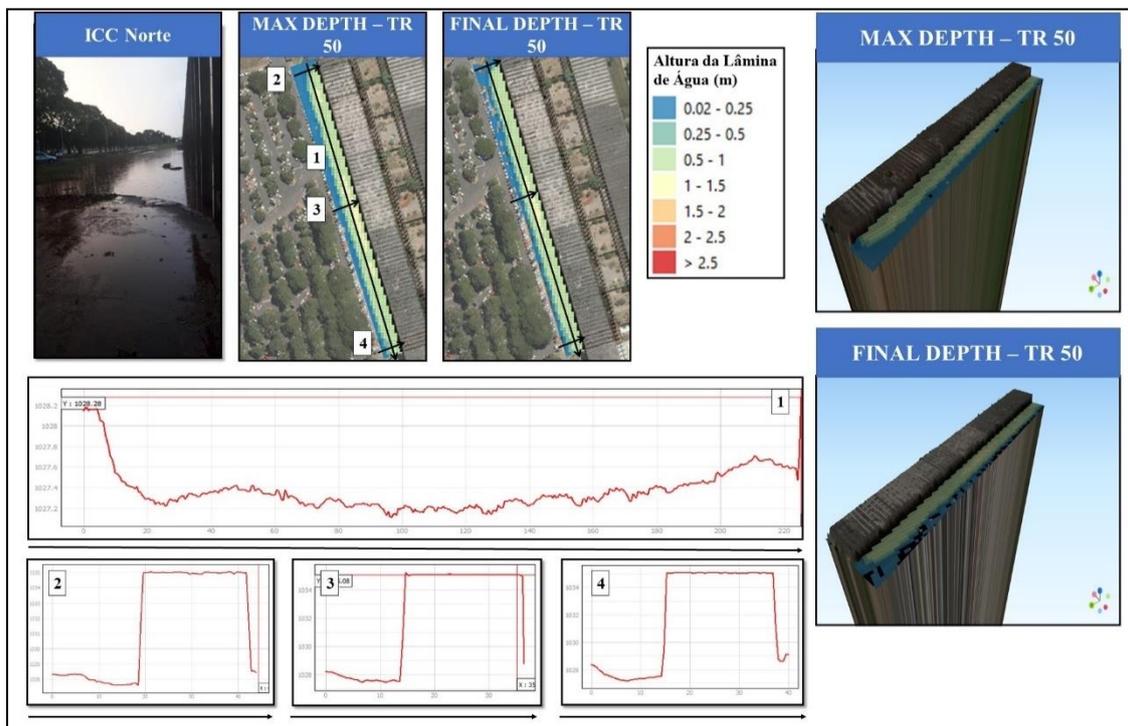


Figura 90 - Exemplo de áreas alagadas ICC no campus da Universidade de Brasília – UNB na Asa Norte/Plano Piloto.

Contudo, na área gramada, não existem bocas de lobo, enquanto estas estão localizadas no estacionamento (Figura 91). Conforme mencionado anteriormente, o fluxo atinge a altura do meio-fio e direciona-se para a área gramada.

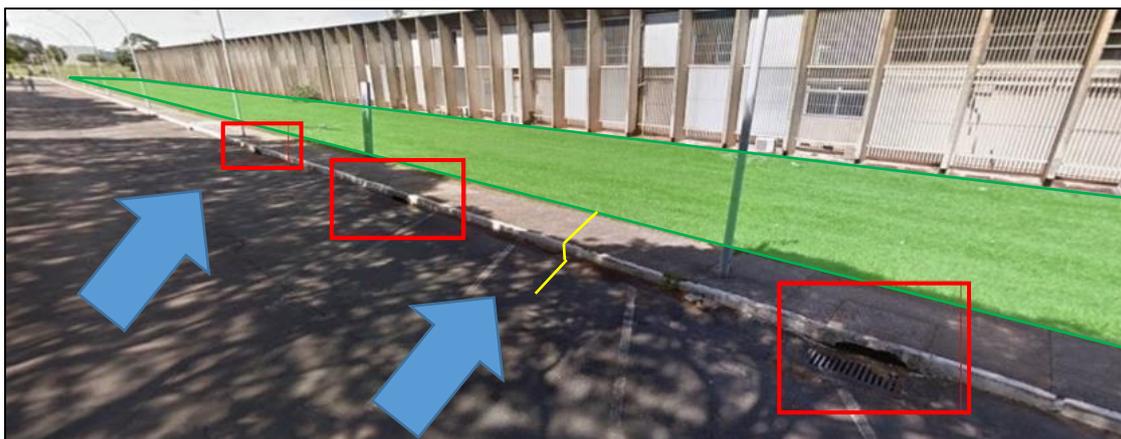


Figura 91 – Localização das Bocas de Lobo no ICC Norte, no campus da Universidade de Brasília – UNB, na Asa Norte/Plano Piloto – DF. Em vermelho, são as bocas de lobo, as setas azuis indicando a direção do fluxo superficial e a superfície em verde é a área livre que alaga.

Outros pontos críticos de alagamento que ocorrem na Asa Norte no Plano Piloto são o Instituto Ambiental de Brasília – IBRAM localizado na SEPN 511 e a entre quadra SQN 112 e SQN 212. Na Figura 92, é apresentado a rede de drenagem de águas pluviais sobrecarregada para estes dois trechos citadas e na Figura 93 é apresentado rede de drenagem de águas pluviais inundada, para os mesmos trechos.

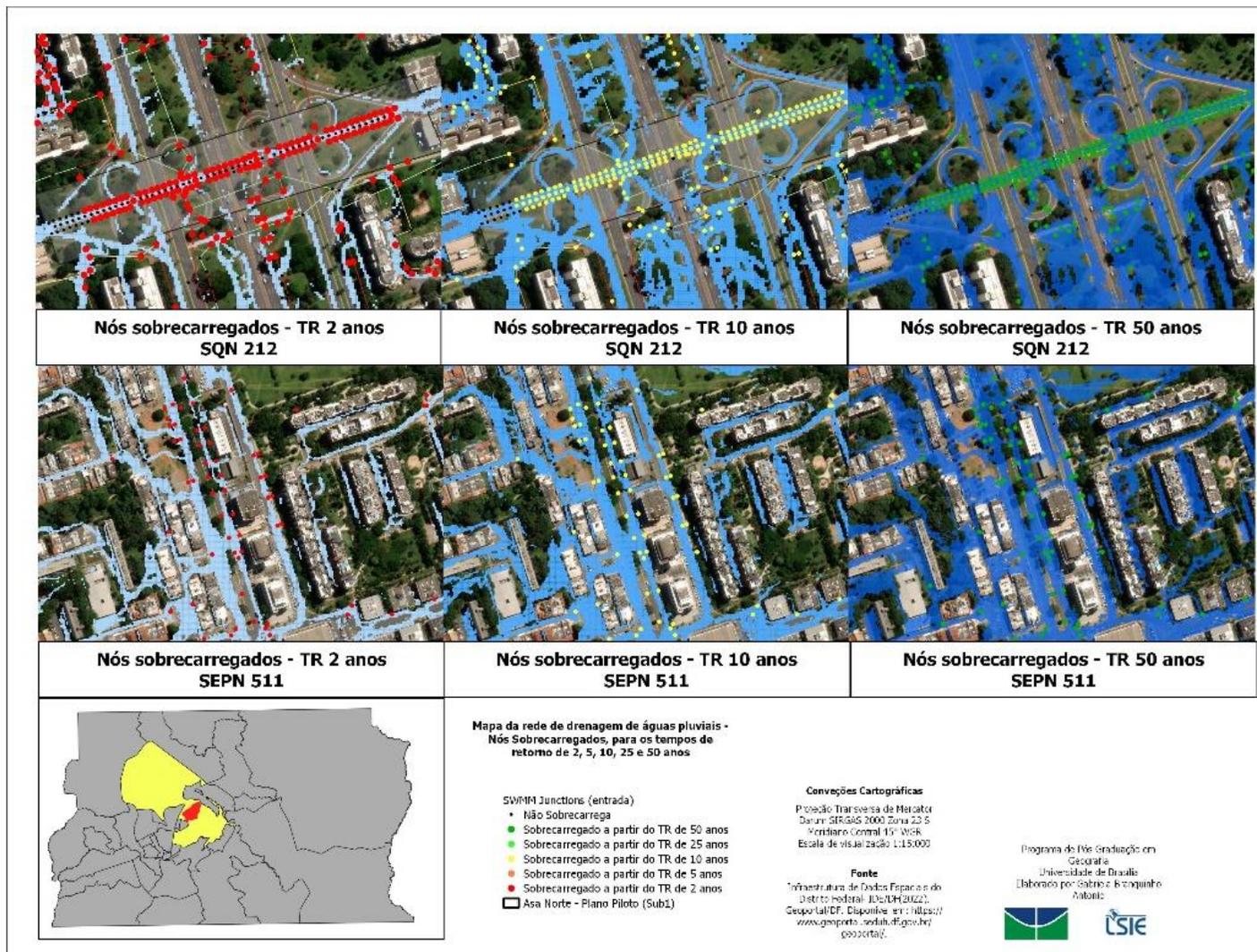


Figura 92 – Situação da rede de drenagem de águas pluviais sobrecarregada nas quadras 112/212 e no SEPN 511, na Asa Norte, Região Administrativa do Plano Piloto.

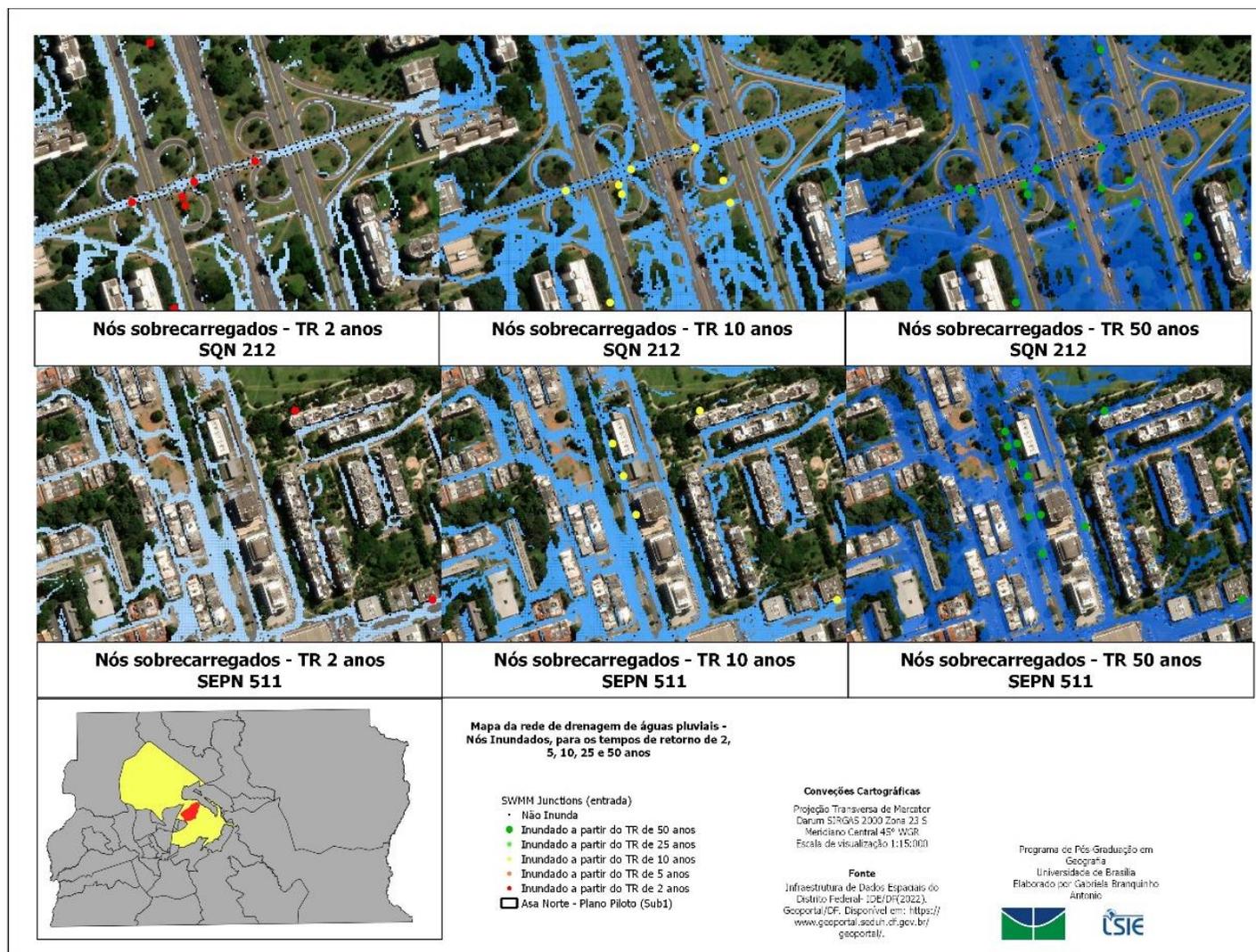


Figura 93 – Situação da rede de drenagem de águas pluviais inundada nas quadras 112/212 e no SEPN 511, na Asa Norte, Região Administrativa do Plano Piloto.

A seguir serão apresentados três perfis, representando a condição da rede de drenagem de águas pluviais no momento aproximado do pico do hietograma de precipitação, na bacia em Mestre D'Armas para três tempos de retorno, sendo eles 2, 10 e 50 anos (Figura 94, Figura 95 e Figura 96).

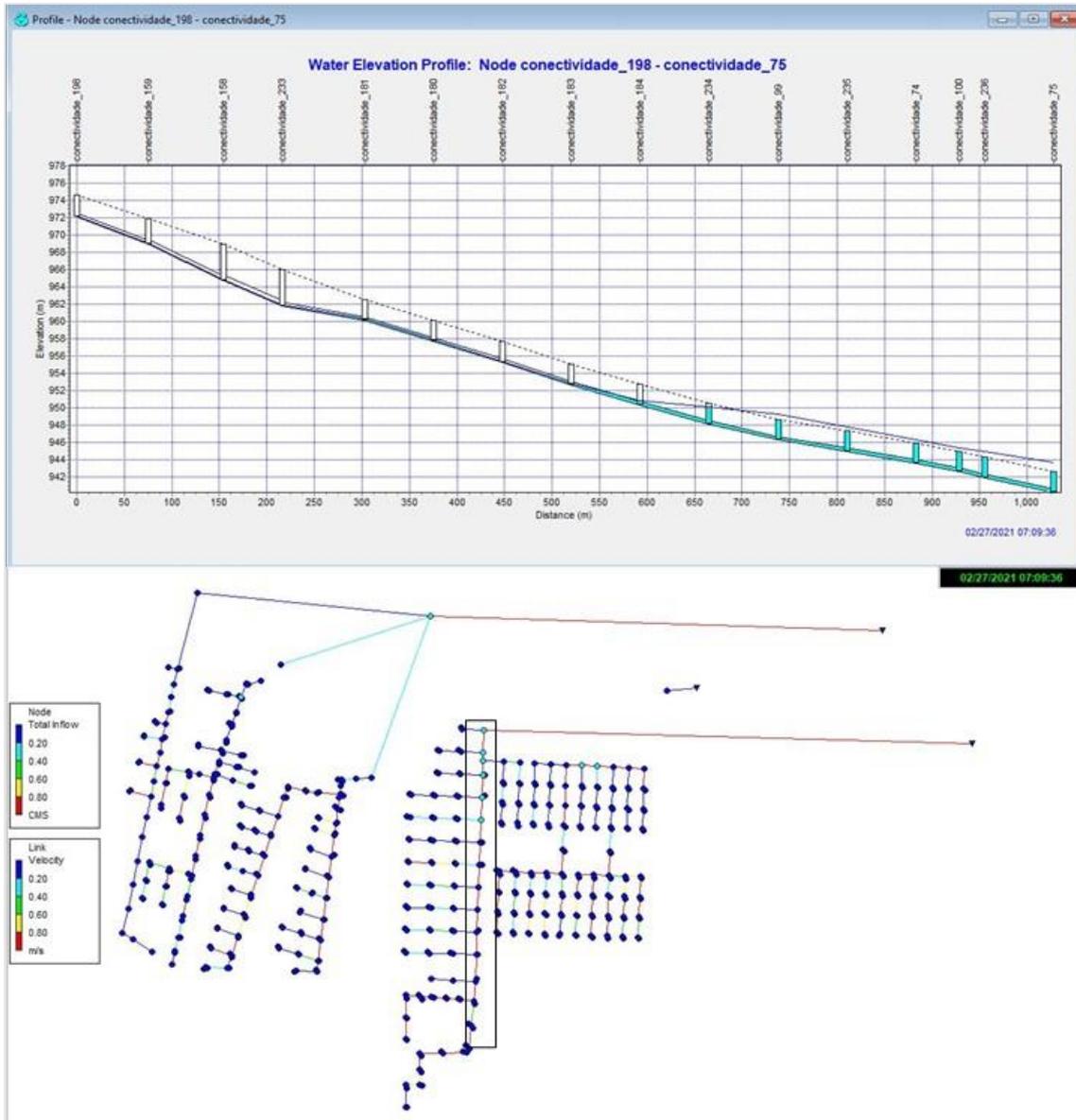


Figura 94 – Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 2 anos.

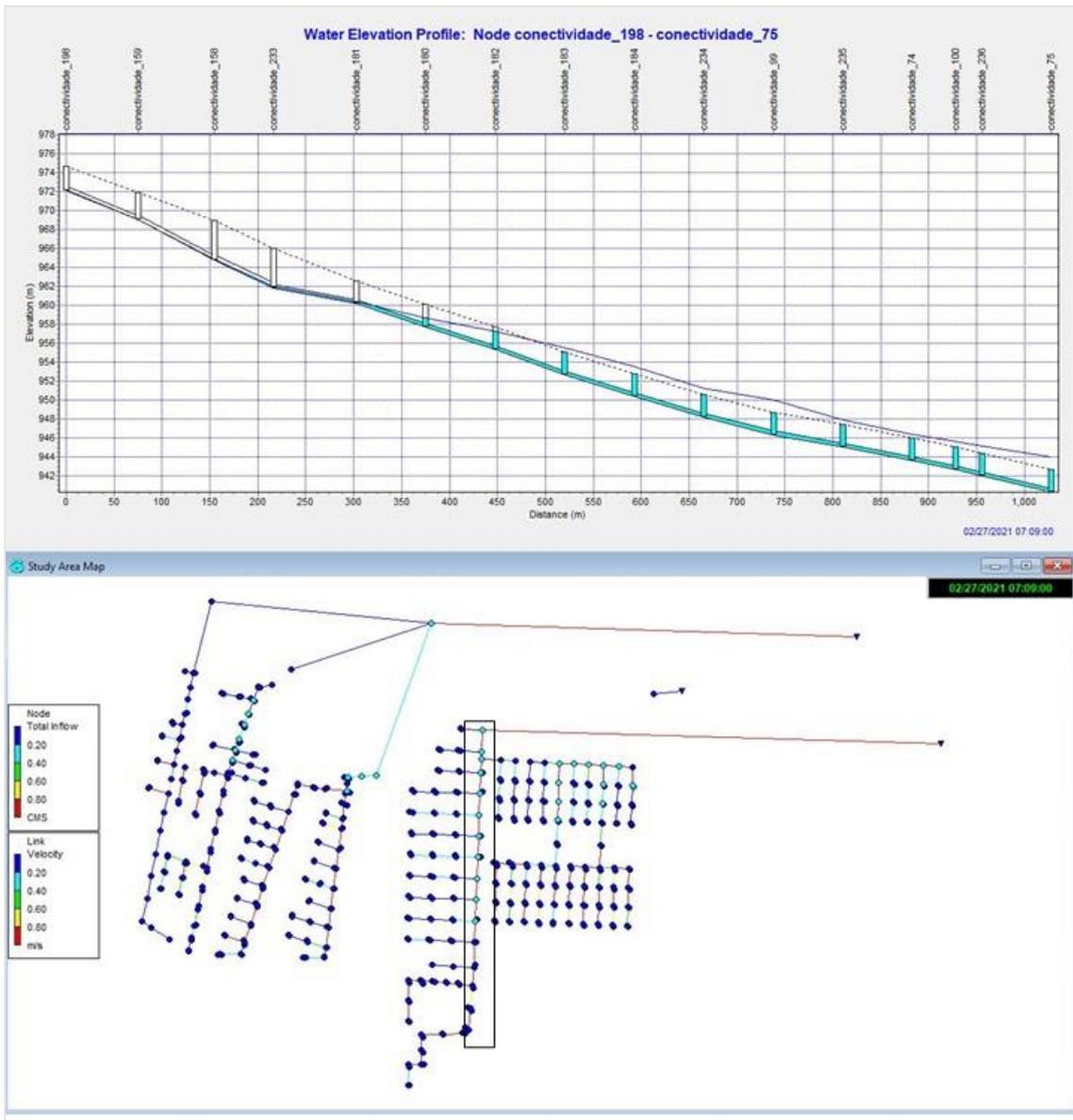


Figura 95 - Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 10 anos.

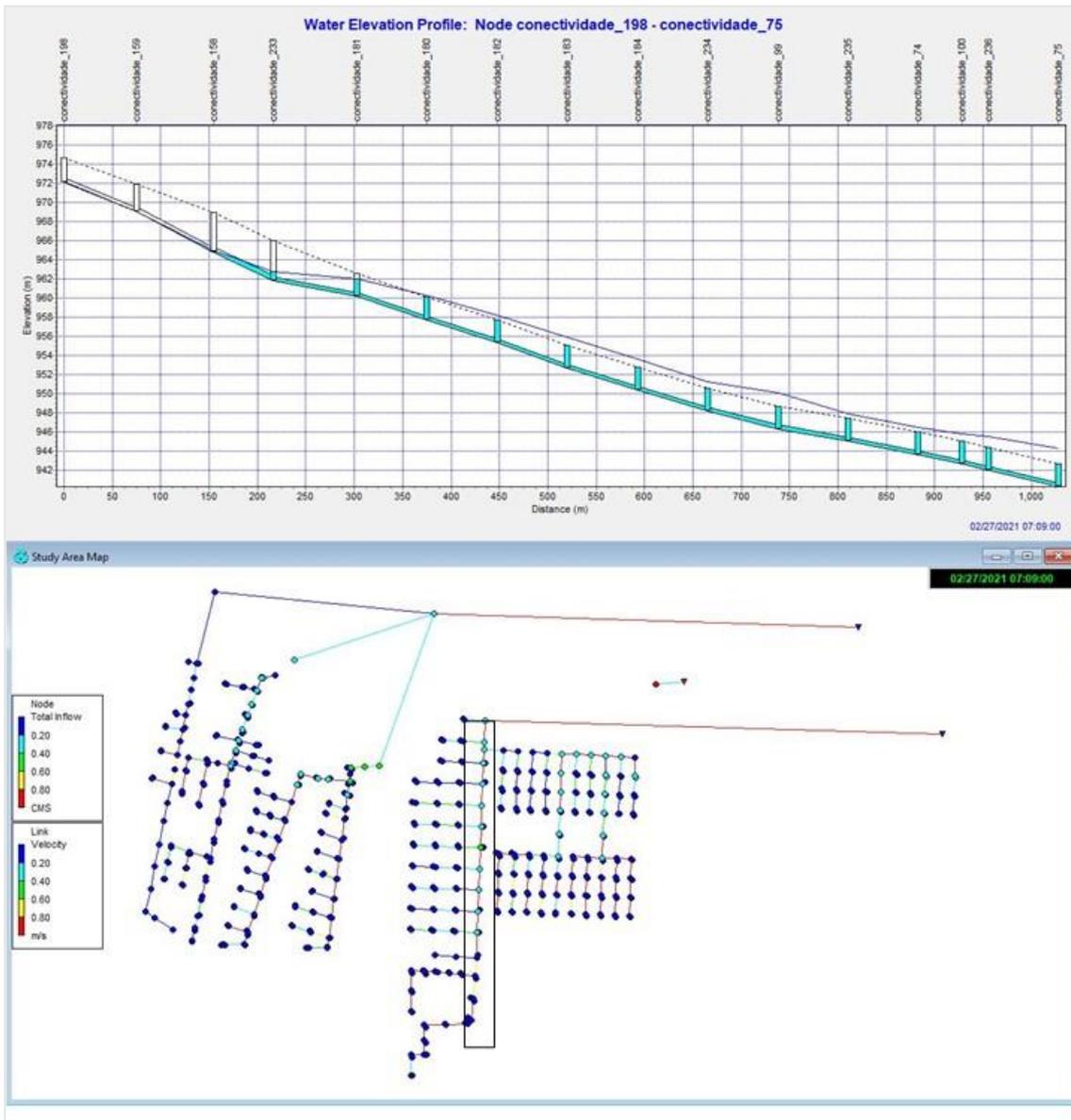


Figura 96 - Perfil de um trecho da rede de drenagem de águas pluviais, para o tempo de retorno de 50 anos.

4.3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Como observado, o uso de modelos bidimensionais, possibilita reproduzir a complexidade inerente aos ambientes urbanos (COSTABILE, et. al., 2019). Além disso, a escala do modelo e dos dados de entrada, podem produzir impactos significativos (LI et. al., 2022) nas simulações de modo que não há um consenso sobre a padronização da escala que se deve adotar em função do tamanho da área de estudo e dos processos que serão simulados.

Bruni et al. (2015) avaliaram a relação entre a área de captação urbana e as resoluções espaço-temporais, em que, para pequenas bacias urbanas com menos de 7 km², a simulação hidrológica urbana requer os dados de chuva com resolução temporal de pelo menos 5 min e resolução espacial de 1,7 km.

Enquanto Li et al. (2022), analisaram malhas numéricas com resoluções espaciais de 50, 100, 150 e 200 metros, considerando uma área de estudo de 13,31 km² e concluíram que para a área citada uma malha de 150 metros proporcionou resultados melhores nos parâmetros do fluxo.

Alguns autores como Zhang e Montgomery (1994) relatam que um modelo de alta resolução espacial pode levar à subestimação sistemática do fluxo de pico, em contrapartida, alguns autores como Hu et al. (2017) e Jiang et al. (2021), apontam que a resolução espacial mais grosseira da malha, pode deflagrar a superestimação da altura da lâmina de água.

Alteneau et al. (2017), realizaram simulação com resoluções espaciais de 10 m², 25 m² e 100m² para uma área de aproximadamente 90 km. Os autores observaram que à medida que a escala perde o nível de detalhamento à uma piora no modelo, de modo que, para a dinâmica de inundação que estava sendo trabalhada, as escalas de 10 m² e 25 m² apresentaram resultados melhores. Foi observado ainda que o RMSE apresentou pouca variação entre as escalas supramencionadas.

Considerando o exposto acima, a fim de contribuir com a discussão, ao observar os resultados das lâminas de água obtidas pelas simulações realizadas por Demasceno (2021) e os encontrados nessa pesquisa, notamos o mesmo padrão de subestimação e superestimação.

Os resultados obtidos por Demasceno (2021), adotando uma resolução espacial de 10 m x 10 m com uma malha numérica hexagonal, apresentou lâminas de água mais elevadas, como pode ser observado na Figura 97.

Mais precisamente, observa-se uma área à frente do ICC (na porção central) ambos os modelos apresentam uma zona de acúmulo de escoamento superficial. No entanto, essa zona é subestimada nos modelos desta pesquisa e superestimada no modelo de Demasceno (2021), corroborando com as observações feitas por Hu et al. (2017) e Jiang et al. (2021). Essas pesquisas destacam que quanto maior for a resolução

espacial da malha, maior será a possibilidade de ocorrer lâminas de água mais elevadas.

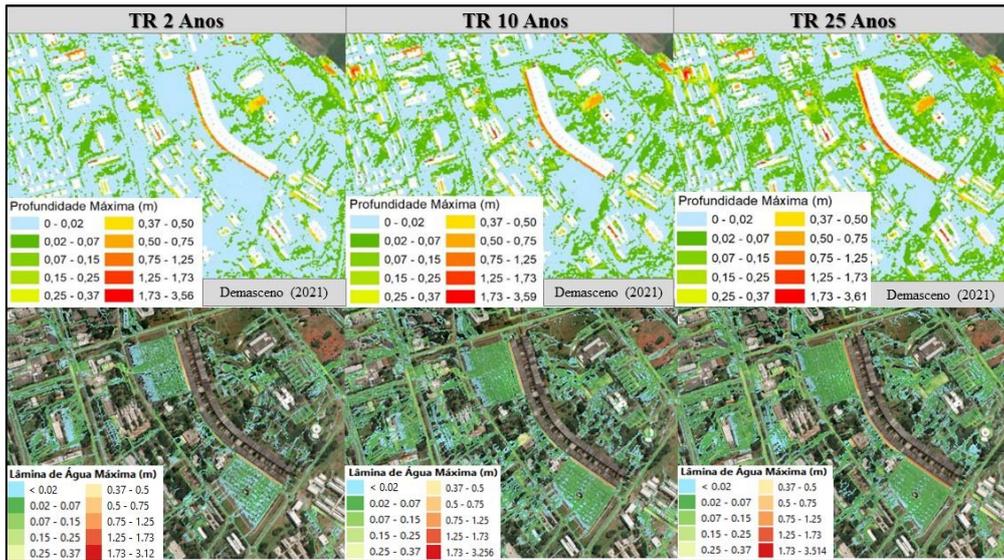


Figura 97 - Resultado da simulação realizado por Demasceno (2021) para o ICC no campus da Universidade de Brasília – UNB na Asa Norte/Plano Piloto e os resultados obtidos na presente pesquisa.

De acordo com Shen e Tan (2020), para simular áreas urbanas, o tamanho da célula computacional e a resolução do MDT precisam ter uma escala menor ou igual que a do edifício, casas e sistema viário, para que a representação seja adequada. Bertsch et al. (2022) discutem a escala necessária para representar corretamente o sistema viário e a rede de drenagem de águas pluviais, indicando que malhas numéricas “finas”, menores que 5 m² seriam adequadas.

A documentação teórica do modelo FLO-2D, reforça a necessidade de que o menor comprimento da rede de drenagem seja igual o maior que o lado do elemento da malha numérica, evitando dessa forma problemas no modelo, durante a propagação do fluxo dentro da rede.

No caso dessa pesquisa, a resolução espacial adotada foi de 2 m x 2m e o MDT utilizado foi elaborado a partir dos dados de LIDAR, dessa forma, foi possível observar como o modelo consegue representar adequadamente o sistema viário, de modo que, a mancha alagada se ocorre predominantemente nas vias, além disso, observasse que o método utilizado para representar as edificações pode ser uma alternativa ao Modelo Digital de Superfície – MDS (Figura 98).

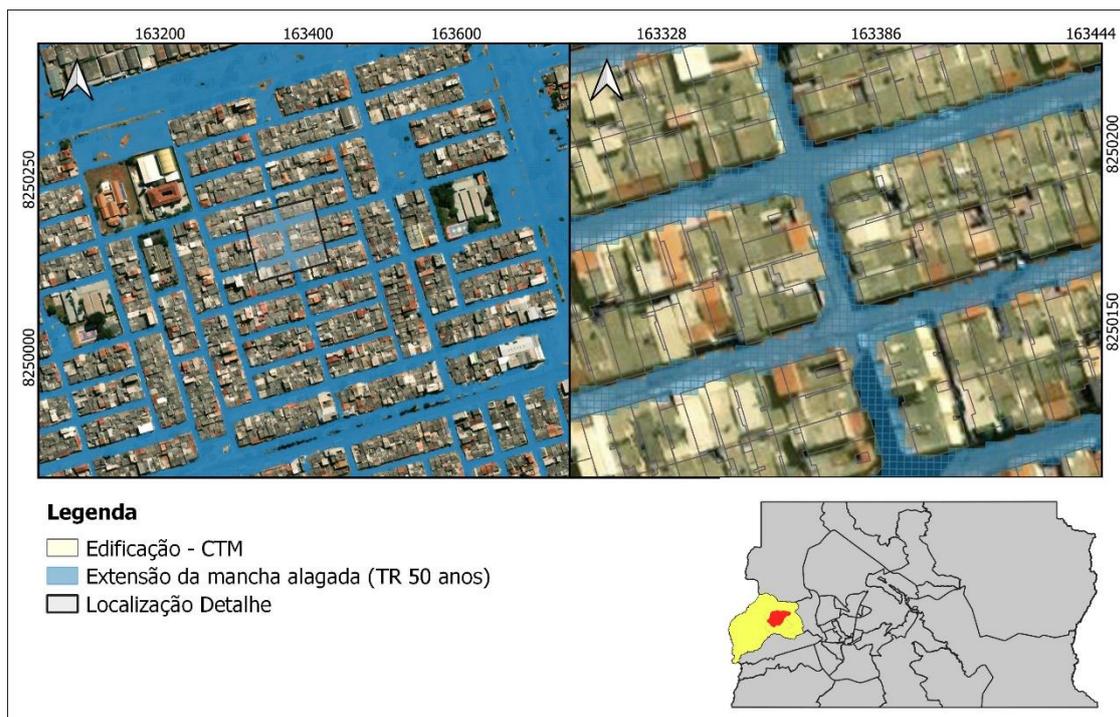


Figura 98 – Exemplo de da influência do modelo digital de terreno no resultado da simulação.

Contudo, é fundamental ressaltar que a adoção de escalas de detalhe, comumente estão condicionadas à disponibilidade de dados e ao custo computacional. Hu et. al. (2018) relata que o uso de uma malha uniforme de alta resolução em todo o domínio computacional pode fazer com que a simulação seja executada em uma velocidade lenta. Podendo ser ainda mais onerosa, a depender do tamanho do domínio computacional, do tempo de simulação, do intervalo de tempo adotado e dos processos que estão sendo simulados (FLO-2D, 2021).

Considerando a escala da malha numérica utilizada nessa pesquisa e a dimensão das sub-bacias hidrográficas, é apresentado na Figura 99 as durações das simulações por área de estudo e tempo de retorno, sendo as suas respectivas áreas e quantidade de elementos apresentados na Tabela 30. Demonstrando o tempo de processamento das simulações.

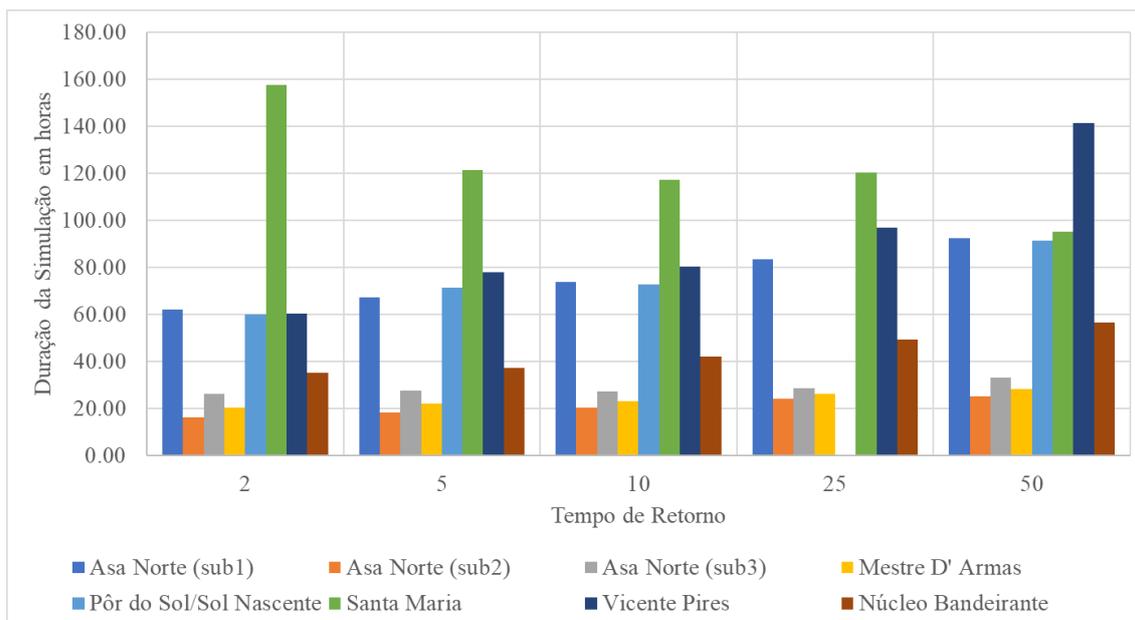


Figura 99 – Duração das simulações em horas.

Tabela 30 – Relação da área e da quantidade de elementos por área de estudo.

| Área de estudo | Quantidade de Elementos | Área (m ²) | Área (km ²) |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Área: Asa Norte (sub1) | 3102535 | 12410140 | 12.41 |
| Área: Asa Norte (sub2) | 1195656 | 4782624 | 4.78 |
| Área: Asa Norte (sub3) | 1942289 | 7769156 | 7.77 |
| Área: Mestre D' Armas | 1831219 | 7324876 | 7.32 |
| Área: Pôr do Sol/Sol Nascente | 3561179 | 14244716 | 14.24 |
| Área: Santa Maria | 4549121 | 18196484 | 18.20 |
| Área: Vicente Pires | 3069705 | 12278820 | 12.28 |
| Área: Núcleo Bandeirante | 3012058 | 12048232 | 12.05 |

Em virtude das questões supracitadas, usualmente, modelos com alto detalhamento da malha são aplicados a pequenos recortes de área, como lotes ou quadras (DONG et al., 2022), desconsiderando a dinâmica do escoamento superficial ao nível de bacia hidrográfica.

Todavia, ao não considerar a dinâmica hidrológica associada à bacia ou sub-bacia hidrográfica, pode haver um aumento na incerteza associada ao resultado obtido pelo modelo, o que pode também levar a estratégias de mitigação de alagamentos pouco eficazes. Podendo ainda deflagrar a transferência dos pontos de alagamento para outra porção.

4.3.5. VALIDAÇÃO DO MODELO COM BASE NOS DADOS CIDADÃOS

Considerando o que já foi exposto ao longo dessa pesquisa, optou-se por utilizar os pontos de notificações de alagamento como forma de validação dos resultados obtidos nas simulações.

De acordo com Luo et al. (2022), diante de uma situação de escassez de dados observacionais e oficiais para realizar a etapa de validação de modelos, podem ser utilizadas informações como marcas de água nas fachadas dos edifícios, fotos ou vídeos registrados durante ou logo após o alagamento.

Oliveira (2021), utilizou as alturas e a localização espacial dos dados cidadãos nas etapas de calibração e validação de um modelo de inundação, devido à ausência de informação na sua respectiva área de estudo.

A validação é uma forma de avaliar se os resultados dos modelos são suficientemente precisos e confiáveis, para a tomada de decisões ou se necessitam de novos ajustes. É importante ressaltar que, de qualquer perspectiva, a validação de modelos implica em determinar duas coisas principais:

- a) que o modelo fornece uma estimativa da(s) variável(ais) de interesse; e
- b) que tal estimativa seja fornecida com um nível de exatidão/precisão que esteja de acordo com o uso pretendido.

Dessa forma, para realizar a etapa de validação, foram utilizados 150 pontos de notificações de alagamento que estão inseridos dentro da poligonal utilizada na modelagem da sub-bacia da Asa Norte.

Os pontos das demais áreas não foram utilizados por não terem seus tempos de retorno calculados, de modo a compatibilizar com as manchas de alagamento para diferentes tempos de retorno.

Como pode ser observado na Figura 100 e Figura 101, dos 150 pontos de notificações de alagamentos, 84% deles estão associados a tempos de retorno que variam de 0 a 2 anos e 16% das notificações apresentam tempos retorno que variam de > 2 anos e < 50 anos.

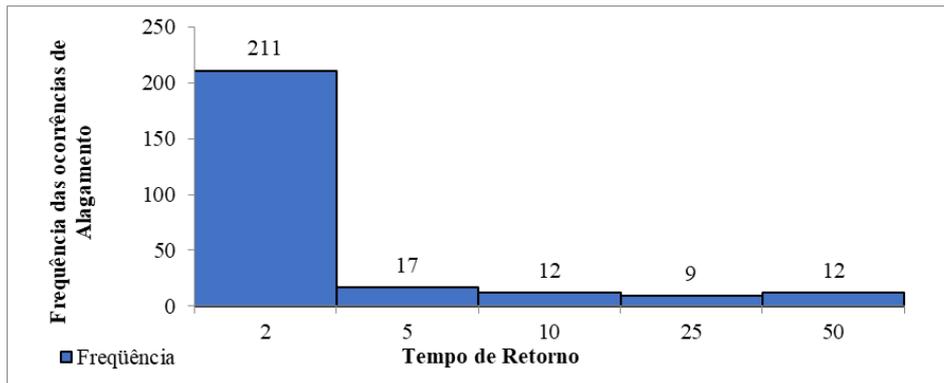


Figura 100 - Frequência das ocorrências de alagamento por tempos de retorno

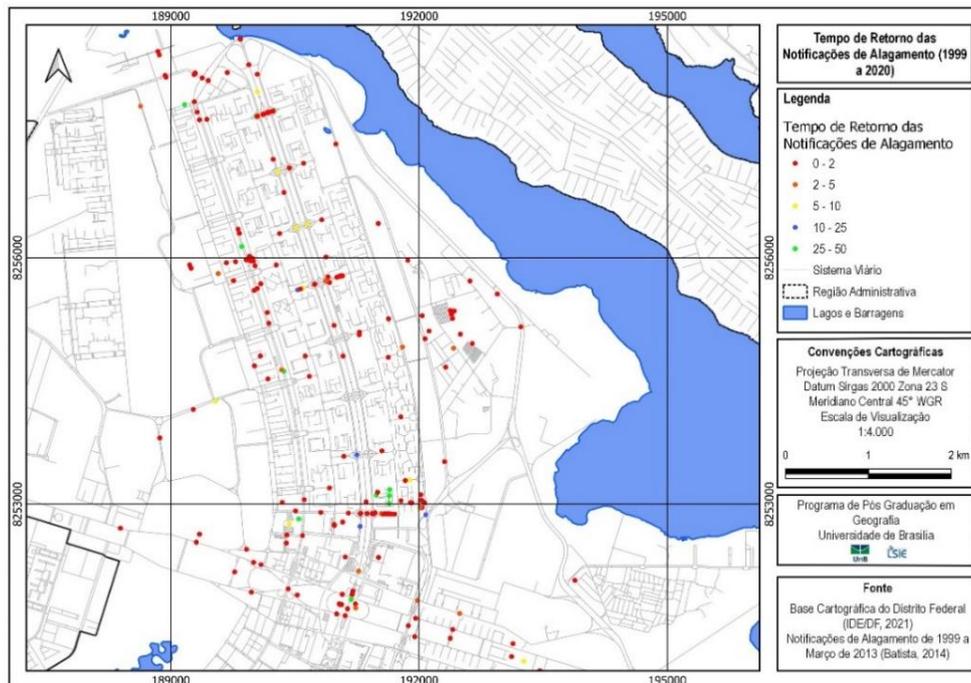


Figura 101 – Mapa com os tempos de retorno espacializados dos eventos que deflagraram as ocorrências de alagamento na Bacia Hidrográfica da Asa Norte

Quando realizamos a avaliação inicial, verificamos que a aderência entre os pontos de notificações de alagamento a mancha alagada simulada, relativa ao período de retorno de até 2 anos é de 82,5% (Tabela 31).

Tabela 31 - Quantidade totais de notificações de alagamento por intervalo de tempo de retorno em relação a quantidade de notificações de alagamento que intersectam a mancha alagada.

| Tempo de retorno | Total de notificações | Total de notificações que intersectam a mancha alagada | Porcentagem das notificações que intersectam a mancha alagada |
|------------------|-----------------------|--|---|
| 0 - 2 | 126 | 104 | 82,5% |
| 2 - 5 | 8 | 6 | 75% |

| Tempo de retorno | Total de notificações | Total de notificações que intersectam a mancha alagada | Porcentagem das notificações que intersectam a mancha alagada |
|------------------|-----------------------|--|---|
| 5 - 10 | 8 | 8 | 100% |
| 10 - 25 | 3 | 3 | 100% |
| 25 - 50 | 5 | 5 | 100% |

Nas figuras que serão apresentadas a seguir (Figura 102, Figura 103, Figura 104, Figura 105 e Figura 106), observamos a localização espacial dos pontos que intersectam a mancha alagada e aqueles que não intersectam.

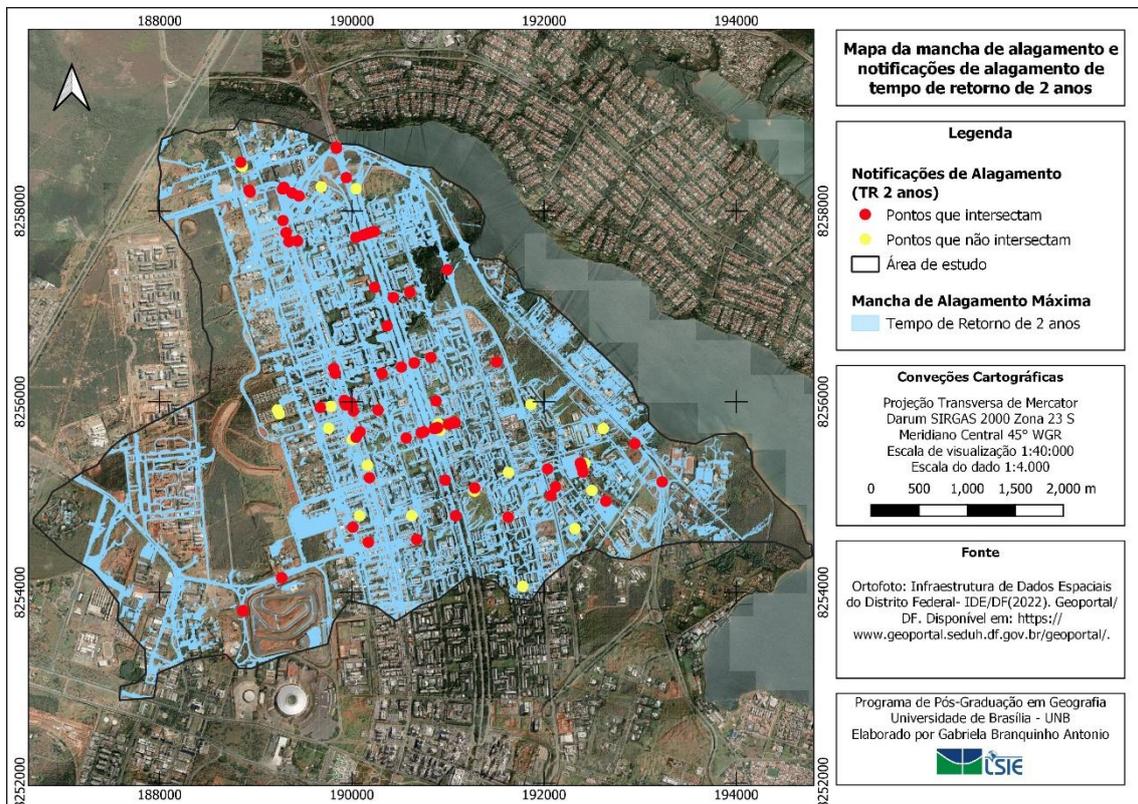


Figura 102 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF

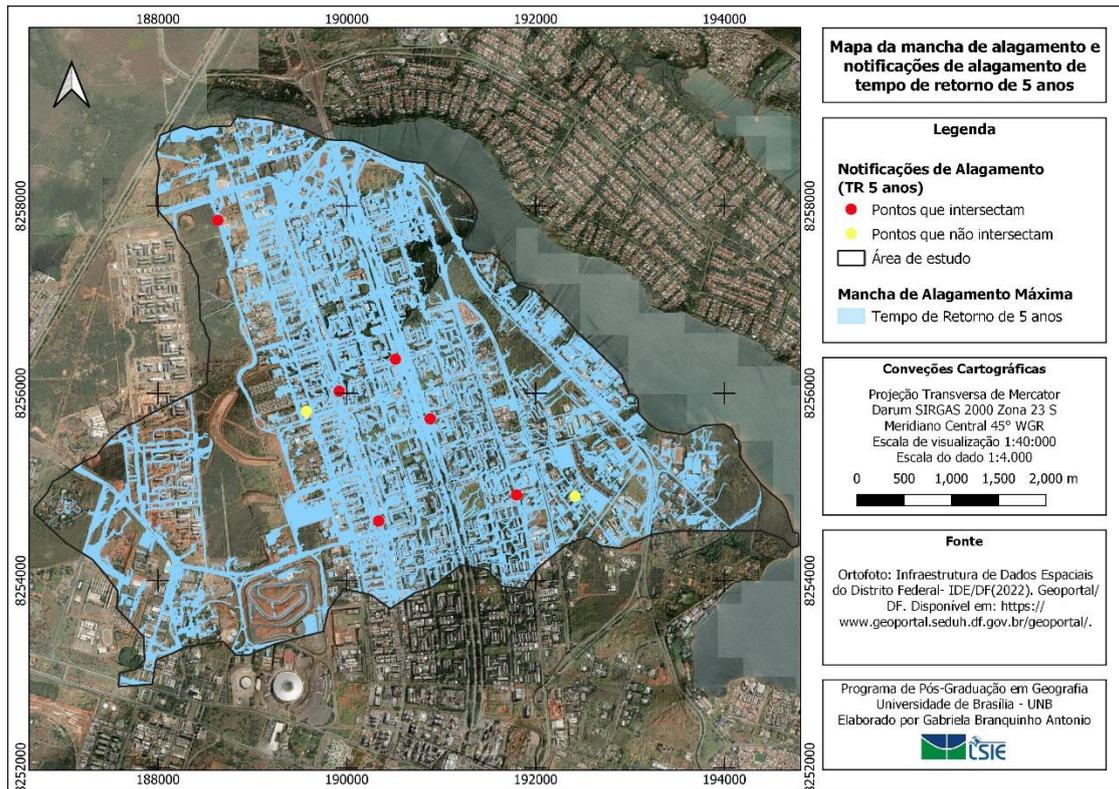


Figura 103 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF

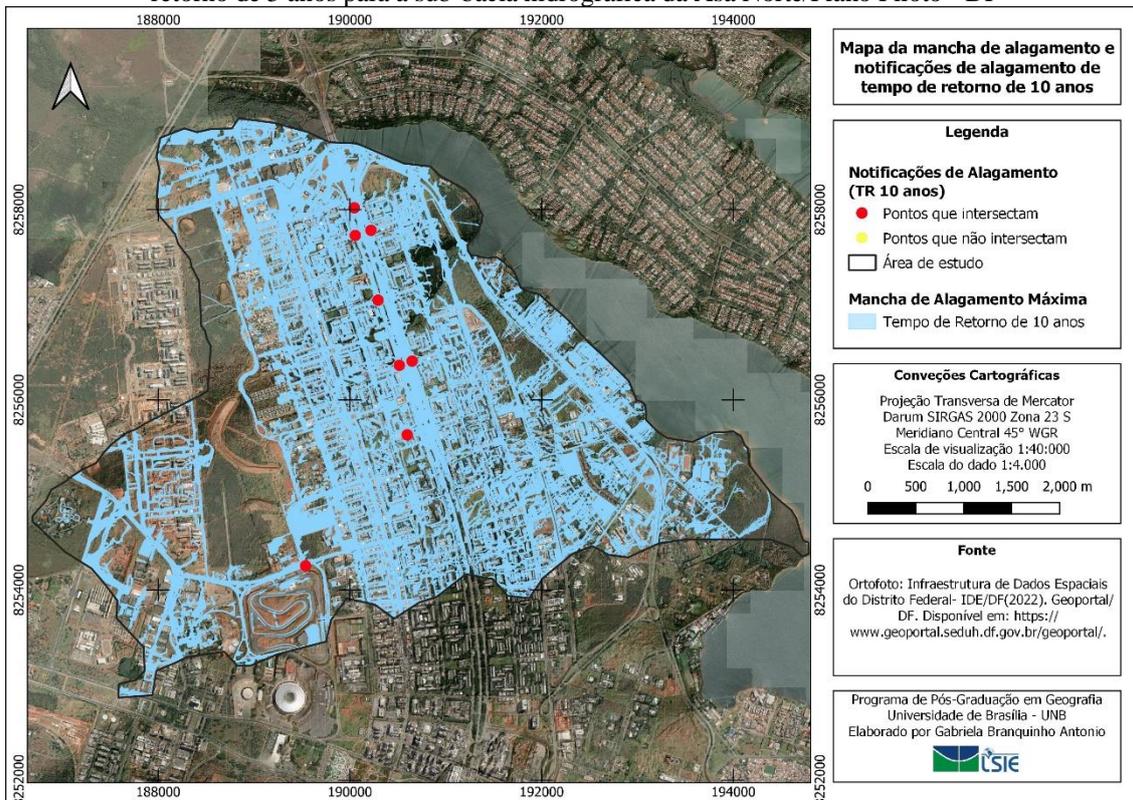


Figura 104 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF

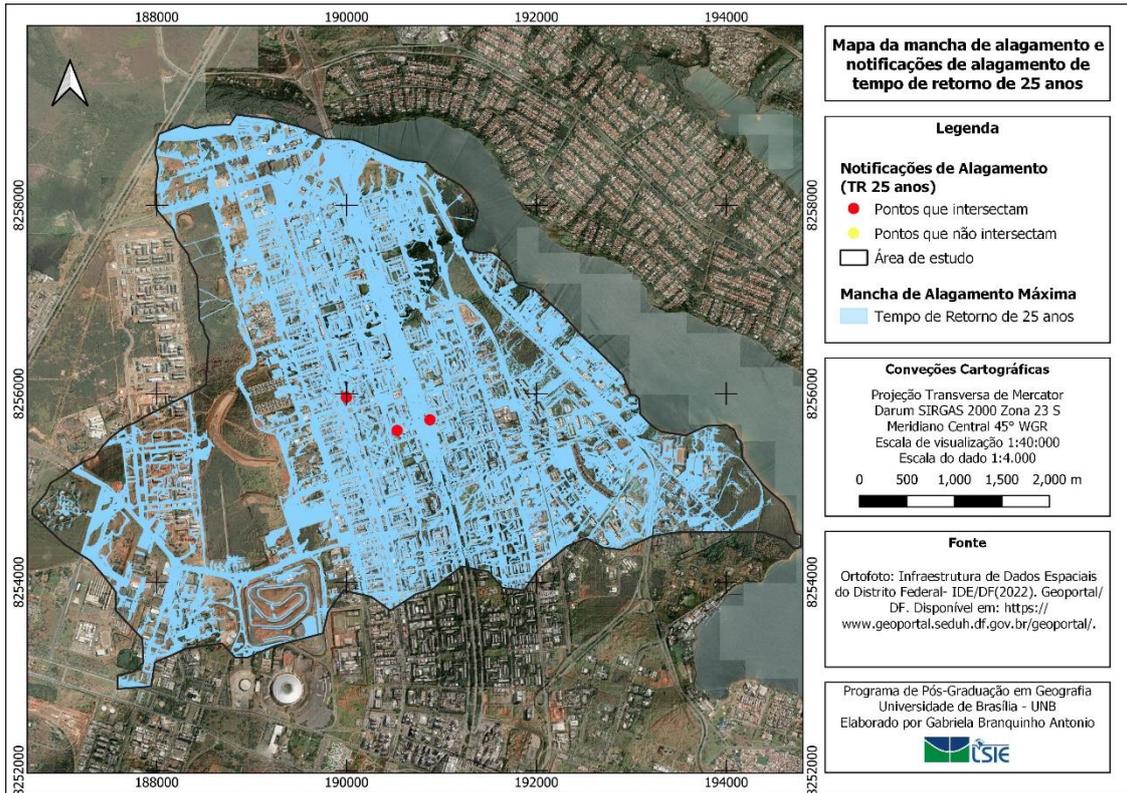


Figura 105 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF

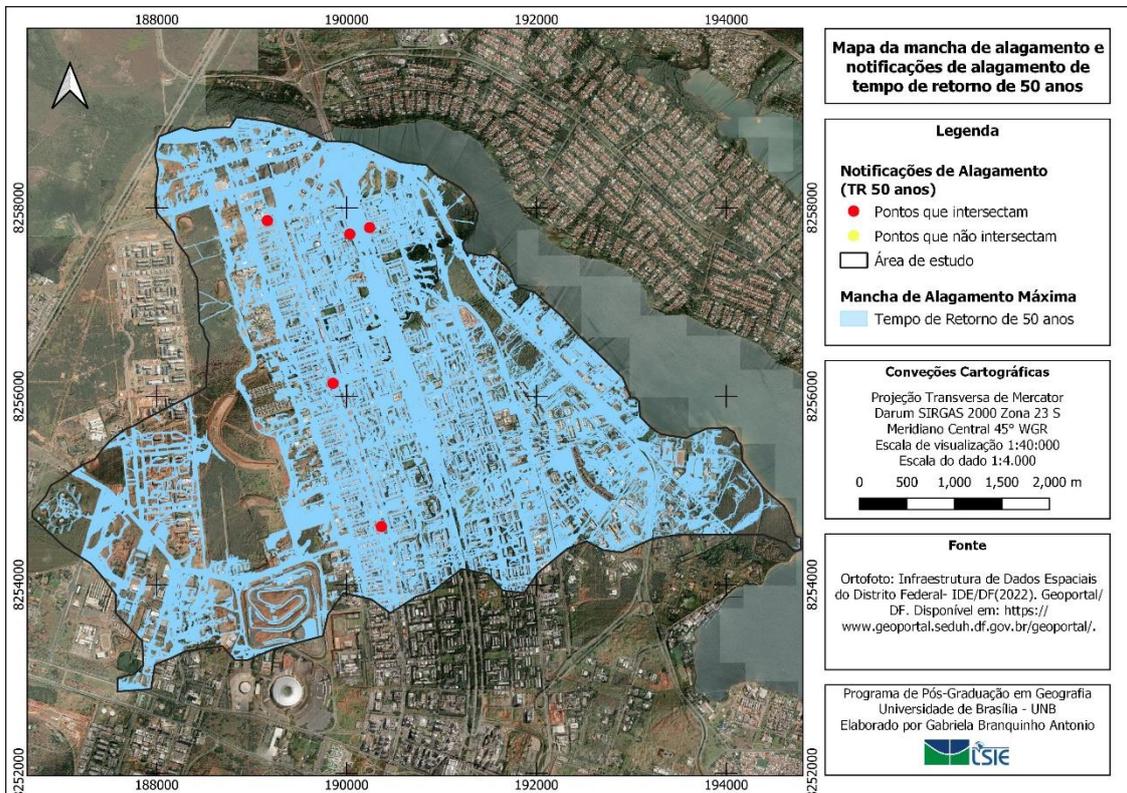


Figura 106 – Mancha alagada máxima e notificações de alagamento para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto - DF

Foi filtrado os pontos de notificações de alagamento que intersectam a mancha de alagamento e que tiveram a coluna de ‘altura de lâmina de água’ preenchida, visando verificar a correlação entre a altura simulada e a altura cadastrada. Considerando o critério estabelecido e o tamanho do conjunto de dados, foi utilizado para essa etapa, somente o período relativo ao tempo de retorno de até 2 anos (Tabela 32).

Tabela 32 – Relação das notificações de alagamento que relataram altura da lâmina de água

| Tempo de retorno de 2 anos das notificações de alagamentos | |
|--|------|
| Quantidade de notificações que intersectam a mancha alagada | 104 |
| Quantidade de pontos com altura cadastrada | 23 |
| Correlação de Pearson | 0,66 |

Considerando os 104 que intersectam a mancha de alagamento, para o tempo de retorno de 2 anos, somente 22% tinham a descrição da altura de lâmina de água aproximada, a qual teve como embasamento, fotos e vídeos das notícias usadas como referência.

Quando aplicadas as métricas da Média das Diferenças Absolutas (MD) e da correlação de Pearson, observa-se que em 91% dos pontos, o modelo tende a subestimar as alturas de lâmina de água, em relação as alturas cadastradas.

Contudo, cabe ressaltar que as alturas cadastradas estão associadas também a condição real do sistema de drenagem de águas pluviais, de modo que, as alturas simuladas, consideram um cenário ideal de funcionamento do sistema de drenagem de águas pluviais.

4.4.DIRETRIZES PARA MITIGAÇÃO DOS ALAGAMENTOS

O processo de urbanização vem alterando significativamente a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, de modo que as intervenções de drenagem urbana tradicional já não são suficientes para tratar as disfunções hidrológicas que a urbanização e a impermeabilização do solo produzem. Isso fica evidente nessa pesquisa, quando mesmo simulando a rede de drenagem de águas pluviais considerando o seu pleno funcionamento, ainda assim, foi observado a ocorrência de manchas de alagamento, em todos os cenários simulados de precipitação de tempo de retorno.

Além disso, observou-se também que, embora existam porcentagens significativas de áreas não impermeabilizadas, essas áreas não conseguem amortecer todo o volume excedente produzido. Produzindo alagamentos significativos no sistema viário.

Diante do explicitado, fica evidente a necessidade de adotar modelos gerenciamento das águas pluviais pautadas em ideais sustentáveis como *Low Impact Development* (LID) ou Desenvolvimento de Baixo Impacto.

Os métodos para o controle do escoamento superficial e a qualidade do escoamento, considerando o LID são denominadas como técnicas compensatórias ou *Best management practices – BMP's* ou infraestruturas verdes de drenagem urbana. Embora o Distrito Federal atualmente disponha de algumas as bacias de retenção e retenção, que são uma modalidade de técnicas compensatórias que buscam o controle/amortecimento do escoamento, esse tipo de estrutura demanda espaço, podendo ter sua aplicação inviabilizada a depender do grau de consolidação urbana e da morfologia da bacia hidrográfica.

Dentro desse contexto, recomenda-se que para nas áreas que ainda não foram ocupadas, que os projetos urbanísticos sejam elaborados priorizando a utilização de técnicas compensatórias na fonte, as quais apresentam uma escala menor e atuam de forma descentralizada no território, podem ser aplicadas em casas, lotes, espaço públicos, estacionamentos e sistema viário.

Dessa forma, no sistema viário implantado ou futuro, recomenda-se que sejam adotadas técnicas que buscam controlar a quantidade do escoamento superficial, visando mitigar os alagamentos e reduzir o volume excedente que chega na rede de drenagem de águas pluviais. Dessa forma, com base no *Green Streets Handbook* (2021), recomenda-se, quando as condições, geotécnicas permitirem, que:

- i. Nas **Vias Arteriais** sejam adotadas biovaletas e arborização urbana apropriada;

- ii. Nas **Vias Coletoras** sejam adotadas biorretenções, extensão de meio-fio e arborização urbana apropriada;
- iii. Nas **Estradas e vias locais** sejam adotadas biorretenção, extensão de meio-fio e arborização urbana apropriada;
- iv. Nos **estacionamentos** sejam adotados biorretenção, biovaletas, arborização urbana apropriada

Ainda considerando o contexto de ocupações novas e irregulares e a pressão para o máximo aproveitamento ou ocupação dos lotes, é importante que sejam realizados estudos que busquem adequar a taxa de permeabilidade dos lotes, considerando os aspectos do meio físico, a densidade populacional a ser utilizada e as diferentes tipologias de parcelamento do solo urbano.

Além disso, em áreas de regularização de interesse social, que comumente apresentam moradias precárias, e que incidem em locais com maior susceptibilidade à ocorrência de alagamentos, como é o caso do Pôr do Sol, Mestre D'Armas e da Vila Cauhy, recomenda-se que sejam realizadas vistorias a fim de avaliar o grau de vulnerabilidade das edificações.

Em áreas como a Asa Norte, que mesmo apresentando uma porcentagem de área permeável relativamente alta, e, mesmo assim são acometidas frequentemente por episódios de alagamento, recomenda-se a manutenção das áreas verdes e a adoção de técnicas compensatórias de infiltração forçada, visando incrementar a taxa de infiltração dessas áreas. Desde que sejam considerados os critérios geotécnicos pertinentes.

Considerando os resultados apresentados nessa pesquisa, entende-se que é de grande importância que se estabeleçam instrumentos legais e estudos técnicos que contribuam para orientar o planejamento urbano e as novas ocupações do solo, de modo a evitar que novos pontos de alagamento surjam.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.2. ALAGAMENTOS NO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DADOS CIDADÃOS

A relação entre as áreas ocupadas e as notificações de alagamentos pode indicar uma conexão entre o crescimento urbano ao longo dos anos e o aumento das notificações. A série histórica de 20 anos permitiu identificar os locais com maior e menor densidade de pontos de notificações de alagamento. Isso evidencia que os problemas relacionados a alagamentos não estão restritos a áreas com ocupação irregular e desordenada. De fato, a Região Administrativa do Plano Piloto apresenta a maior concentração e densidade de notificações de alagamento em comparação com as outras regiões.

Diante dessa situação, é imperativo que sejam elaboradas estratégias para mapear as áreas sujeitas a alagamentos no Distrito Federal ou investir nos instrumentos já existentes. Isso permitirá a implementação de um planejamento estratégico efetivo, principalmente no direcionamento de recursos para obras de infraestrutura e mitigação.

Além disso, é de extrema importância repensar a forma de planejar o território, incorporando ao planejamento urbano e ao Plano Diretor de Ordenamento Territorial estratégias para promover áreas permeáveis, incentivando a infiltração da água em vez do escoamento superficial. Essa abordagem não só visa minimizar os alagamentos e seus impactos, mas também evitar a sobrecarga do sistema de drenagem de águas pluviais.

Embora o mapeamento colaborativo e os dados cidadãos ainda sejam pouco utilizados, fica evidente o potencial dessas informações para análises preliminares do território. É possível levantar hipóteses e caracterizar as causas que contribuem para desencadear os alagamentos. No entanto, é de extrema importância estabelecer protocolos para obtenção, registro e validação dessas informações, a fim de aumentar a credibilidade dos dados e promover sua utilização mais ampla.

5.3. GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT - GPM

Diante do exposto, serão apresentadas algumas considerações a fim de esclarecer as limitações, potencialidades e conclusões alcançadas em relação ao uso do GPM:

- a) A taxa de falha das séries históricas contidas nas estações pluviométricas automáticas é um grande desafio para estudos de modelagem e para verificar o desempenho de outros meios de estimação de precipitação, como os produtos de precipitação de satélite;

- b) A baixa disponibilidade de estações pluviométricas automáticas pode ser considerada uma amostragem insuficiente, considerando que o GPM possui uma resolução espacial de 10 km², enquanto as estações pluviométricas em solo realizam medições pontuais. Isso pode gerar maior incerteza ao considerar a heterogeneidade da chuva.
- c) Com relação a capacidade de predição:
- I. É observado que o GPM apresenta resultados melhores nas escalas anuais, trimestrais e mensais, as quais apresentam Coeficientes de Pearson maiores que 0,7 e Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2) maiores que 0,6, demonstrando uma boa aptidão para estudos hidrológicos regionais; e,
 - II. Quando é analisado a capacidade de predição do GPM em relação ao que é medido pela estação pluviométrica em solo, considerando faixas de precipitação acumulado em 24 horas, nota-se uma melhora na capacidade de predição, obtendo valores de Coeficiente de Pearson maiores que 0,7 para escala de dados diária nas faixas de precipitação maiores que 10 mm/24 horas. Demonstrando potencial para estudos que tratem de precipitações extremas.
- d) Quando analisado os dados por unidade geomorfológica, foi observada uma melhora na capacidade de predição do GPM em relação ao que é medido pela estação pluviométrica em solo na escala diária. Entretanto, recomenda-se que sejam realizados mais estudos, utilizando mais estações pluviométricas que realizem medições de precipitações diárias;

Considerando o contexto de muitas cidades brasileiras possuem uma grande carência de informação de dados de precipitação em escala horária, entende-se que apesar do GPM sempre superestimar os dados da estação pluviométrica, ainda assim, pode ser considerado um dado robusto podendo subsidiar estudos hidrológicos.

Contudo, recomenda-se que sejam realizados mais estudos antes da utilização efetiva dos dados com escalas diárias e horárias, tendo em vista a sensibilidade do GPM em relação as características morfológicas e climáticas.

5.4.MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE ALAGAMENTOS

De maneira geral, o modelo apresentou o comportamento esperado, à medida que foram inseridas precipitações mais intensas. Foi observado um aumento na extensão da área alagada, na altura da lâmina de água e na velocidade do escoamento.

A sub-bacia hidrográfica inserida na Região Administrativa de Vicente Pires apresentou a maior extensão de área alagada máxima. No entanto, a ausência do sistema de drenagem de águas pluviais contribuiu para esse aumento.

Contrariamente ao que ocorre em Vicente Pires, a sub-bacia hidrográfica inserida na Asa Norte - Plano Piloto teve a menor área alagada máxima. No entanto, foi a área de estudo que manteve a maior extensão de área alagada ao final da simulação, mesmo com o sistema de drenagem de águas pluviais implantado. Isso pode indicar insuficiência na rede de drenagem de águas pluviais nesses pontos.

O volume excedente observado na bacia inserida na Asa Norte - Plano Piloto ocorre de forma pontual, principalmente nas tesourinhas e no Instituto Central de Ciências - ICC na Universidade de Brasília.

De maneira geral, em todas as bacias, observa-se que os alagamentos ocorrem prioritariamente no sistema viário, com alturas de lâmina de água relativamente baixas. As lâminas de água mais elevadas ocorrem nas áreas propícias ao acúmulo de água, como as tesourinhas e áreas impermeáveis. Na Asa Norte, isso ocorre nos locais mencionados, enquanto nas demais bacias está principalmente associado aos córregos.

Considerando que todas as bacias apresentam um sistema viário significativamente alagado já no tempo de retorno de dois anos, surge a questão de qual seria o impacto da redução das áreas verdes ou permeáveis no aumento da extensão da mancha alagada e no aumento das lâminas de água médias e, principalmente, máximas.

O fato de a rede coletora da Asa Norte ser predominantemente composta por coletores de 400 mm (microdrenagem), inclusive nas quadras comerciais, pode contribuir para a sobrecarga e/ou extravasamento dos nós (entradas e junções).

5.5.MODELO HIDRODINÂMICO FLO-2D

Atualmente, a integração do modelo FLO-2D com o SIG QuantumGIS (QGIS) facilita a inserção e a manipulação dos dados de entrada. No entanto, existem muitas especificidades em relação à estrutura das colunas e à geometria do plano de informação

que devem ser consideradas na etapa de inserção dos dados no modelo, e essas especificidades não estão detalhadas nos manuais, tornando essa etapa mais complexa.

A curva de aprendizado do modelo é considerada fácil a moderada. Apesar das especificidades mencionadas, o modelo possui uma documentação extensa que está em constante atualização. O plugin desenvolvido para o QGIS também é atualizado regularmente para acompanhar as atualizações do SIG.

O método de representação das edificações é uma abordagem interessante para cidades que não possuem um Modelo Digital de Superfície, proporcionando resultados satisfatórios na representação das áreas edificadas.

A malha numérica regular apresentou bons resultados na representação de áreas urbanas, embora o nível de detalhamento utilizado possa ter levado a uma subestimação dos valores de altura da lâmina de água nos alagamentos.

6. TRABALHOS FUTUROS

São propostas de trabalhos futuros:

- I. Realizar simulações buscando quantificar o impacto que a redução da área permeável pode promover no escoamento superficial;
- II. Realizar simulações com resoluções espaciais diferente, buscando verificar o quanto os parâmetros de altura de lâmina de água e velocidade do escoamento podem ser sub ou superestimados; e,
- III. A partir dos dados produzidos nessa pesquisa, realizar mapeamento de risco e perigo à alamento para as áreas que foram estudadas nessa pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ADEKOLA, O.; LAMOND, J. A media framing analysis of urban flooding in Nigeria: current narratives and implications for policy. **Reg Environ Change**, 18, p. 1145-1159, 2018.

ADORNO, Camila. **Análise do sistema de drenagem da Avenida Setor Habitacional D Sul – Taguatinga**. 2015. 34 f. Artigo (Engenharia Civil), Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2015.

AHMED, A.; SINNAPPAN, S. The Role of Social Media during Queensland Floods: An Empirical Investigation on the Existence of Multiple Communities of Practice (MCoPs). **Pacific Asia Journal of the Association for Information Systems**, v. 5, n. 2, p.1-22, 2013.

ALVES, G. J. **Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no Sul de MG**. 2016. 156 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

APFM. Crisis mapping and crowdsourcing in flood management. **Integrated Flood Management Tool Series**, v. 26, n. 1.0, p. 1–90, 2017.

Altenau, Elizabeth H.; Pavelsky, Tamlin M.; Bates, Paul D.; Neal, Jeffrey C. (2017). The effects of spatial resolution and dimensionality on modeling regional-scale hydraulics in a multichannel river. **Water Resources Research**, 53(2), 1683–1701. doi:10.1002/2016WR019396

ARAÚJO, A. S. (2018). **Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte - DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

ARAÚJO, A. S.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. **Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do lago norte / DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, n. December, 2019.

AZAD, W. H. et al. Evaluation of Difference Mesh Size for Overland Routing Model Wan. **Evaluation of Difference Mesh Size for Overland Routing Model Wan**, 2017.

BACH, P. M. et al. Environmental Modelling & Software A critical review of integrated urban water modelling e Urban drainage and beyond. **Environmental Modelling and Software**, v. 54, p. 88–107, 2014.

BARRETO, Raquel. **Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal**. 2008. 205 f. : il. Dissertação (Mestrado em Geografia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

BARTHÉLÉMY, S., Ricci, S., Morel, T., Goutal, N., Le Pape, E., & Zaoui, F. (2018). On operational flood forecasting system involving 1D/2D coupled hydraulic model and data assimilation. **Journal of Hydrology**, 562(May), 623–634. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.007>

-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 12, p. 1603–1621, 2008.

BATHRELLOS, G., D., Skilodimou, H., D., Soukis, K., Koskeridou, E. Temporal and Spatial Analysis of Flood Occurrences in the Drainage Basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece). **Land**. 2018.

BATISTA, Pedro Henrique Lopes. **Cartografia geotécnica aplicada aos riscos de alagamento e inundação na bacia do rio São Bartolomeu**. 2014. xix, 223 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

BAYMA, A. P. et al. Análise de susceptibilidade a alagamento na bacia hidrográfica do Riacho Fundo – Distrito Federal por meio de sistemas de informação geográfica – SIG. **Territorium**, n. I, p. 77–87, 2017.

BERNET, D. B., Zischg, A. P., Prasuhn, V., & Weingartner, R. (2018). Modeling the extent of surface water floods in rural areas: Lessons learned from the application of various uncalibrated models. **Environmental Modelling and Software**, 109, 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.005>

BEZERRA, Arthur de Matos Rocha. **Alagamentos em Taguatinga Norte: análise da situação e proposta de um sistema de drenagem de águas pluviais entre a Avenida Hélio Prates e o Parque do Cortado**. 2016. 22 f. Artigo (Engenharia Civil), Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2016.

BLADÉ, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos".

Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30(1) pp.1-10

BORGES, M. et al. **Estudo para implantação de técnicas de drenagem sustentável na região administrativa Guará II do Distrito Federal**. XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS ESTUDO, n. December, 2019.

BRAGA, Júlia Oliveira. **Alagamentos e inundações em áreas urbanas: estudo de caso na cidade de Santa Maria – DF. Brasília**, 2016. 33 páginas. Monografia de graduação (Disciplina Prática e Pesquisa de Campo 2), - Departamento de Geografia, Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília.

BRASIL. (2012). Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), e dá outras providências**. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 11 abr. 2012. Disponível em: . Acesso em: 01 jan. 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007

Bruna Soares Teixeira e Laís Alves Costa. **Análise da drenagem na região da sqn 716 – Brasília/ df e propostas de medidas de controle**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. (Engenharia Civil) - Universidade Católica de Brasília.

BRUWIER, M. et al. Influence of urban forms on surface flow in urban pluvial flooding. **Journal of Hydrology**, p. 124493, 2019.

CALLIGARIS, C.; BONIELLO, M. A.; ZINI, L. **Debris flow modelling in Julian Alps using FLO-2D**. Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II. **Anais...: WIT Transactions on Engineering Sciences**. Southampton, UK: WIT Press, 10 jun. 2008 Disponível em: <<http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=DEB08-009-1>>

Capolongo, D., Refice, A., Bocchiola, D., D'Addabbo, A., Vouvalidis, K., Soncini, A., Zingaro, M., Bovenga, F., & Stamatopoulos, L. (2019). Coupling multitemporal remote sensing with geomorphology and hydrological modeling for post flood recovery in the

Strymonas dammed river basin (Greece). **Science of the Total Environment**, 651, 1958–1968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.114>

CARACCIOLO, D. et al. Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. **Atmospheric Research**, v. 213, n. January, p. 309–322, 2018.

CASTRO, Kássia Batista de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. 2013. xix, 122 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CEOLIN, L. et al. **Estudo Hidráulico-Hidrológico de uma Bacia de Detenção em Vicente Pires**. XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS MONITORAMENTO, n. December, 2019.

CHAPRA, S. C. et al. **Métodos Numéricos para Engenharia**. [s.l: s.n.].

CHAVES, Thiago Avelar. **Integração de modelos hidrológico e econômico para a avaliação dos custos internos da erosão na agricultura em bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2016, 140 p.

Chen, A.S., Evans, B., Djordjevi, S., Savi, D.A., 2012b. A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. **Journal of Hydrology**. 426–427, 1–16.

Chen, A.S., Evans, B., Djordjević, S., Savić, D.A., 2012a. Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations. **Journal of Hydrology** 470–471 (23), 1–11.

CHRISTOFOLETI, A. (1999) Modelagem de sistemas ambientais. Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 236p

Confederação Nacional dos Municípios – CNM. 2015. Proteção e Defesa Civil em Âmbito Local: Conceitos e Competências. Disponível em: <[https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca_antiga/Prote%C3%A7%C3%A3o%20e%20Defesa%20Civil%20em%20%C3%A2mbito%20local%20\(2015\).pdf](https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca_antiga/Prote%C3%A7%C3%A3o%20e%20Defesa%20Civil%20em%20%C3%A2mbito%20local%20(2015).pdf)>. Acessado em: junho de 2021.

COSTA, Maria Elisa Leite. **Monitoramento e modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do lago Paranoá**. 2013. xxiv, 179 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COSTABILE, P. et al. Is local flood hazard assessment in urban areas significantly

influenced by the physical complexity of Abstract : **Journal of Hydrology**, p. 124231, 2019.

Companhia de Planejamento do Distrito Federal – CODPLAN. 2020. Índice de Vulnerabilidade Social do Distrito Federal. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/IVS-DF-Resultados-2020.pdf>.

Companhia de Planejamento do Distrito Federal – CODPLAN. 2021. Índice Urbano de Desempenho Ambiental para o Distrito Federal. Disponível em: <https://www.ipe.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Indice-Urbano-de-Desempenho-Ambiental-do-Distrito-Federal-IUDA-DF.pdf>.

CRUZ, A. C. E. et al. **Two-dimensional hydrodynamic modelling of urban flood inundation caused by the southwest monsoon to characterize the impact of twenty-year difference in land use in valenzuela-obando-meycauayan (vom) using flo-2d**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W19, 2019 PhilGEOS x GeoAdvances 2019, 14–15 November 2019, Manila, Philippines

D'AGOSTINO, V.; TECCA, P. R. Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 90, p. 159–170, 2006.

DAMASCENO, F., L. (2021). **Avaliação do Sistema de Manejo de Águas Pluviais na Universidade de Brasília por Simulações 1D-2D**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72 p.

de Albuquerque, J P, Eckle, M, Herfort, B and Zipf, A. 2016. **Crowdsourcing geographic information for disaster management and improving urban resilience: an overview of recent developments and lessons learned**. In: Capineri, C, Haklay, M, Huang, H, Antoniou, V, Kettunen, J, Ostermann, F and Purves, R. (eds.) *European Handbook of Crowdsourced Geographic Information*, Pp. 309–321. London: Ubiquity Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/bax.w>. License: CC-BY 4.0.

DE LONGUEVILLE, B. et al. Citizens as sensors for natural hazards: A VGI integration workflow. **Geomatica**, v. 64, n. 1, p. 41–60, 2010.

DEGROSSI, L. C. et al. Flood citizen observatory: A crowdsourcing-based approach for flood risk management in Brazil. **Proceedings of the International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, SEKE**, v. 2014-Janua, n. January, p. 570–575, 2014.

DELICI, F. N. C.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. **Estudo de implantação de sistemas de drenagem sustentável em Santa Maria -DF**. Simpósio sobre sistemas Sustentáveis, n. December, 2019.

DEVITT, C.; O'NEILL, E. The framing of two major flood episodes in the Irish print news media: Implications for societal adaptation to living with flood risk. **Public Understanding of Science**, 26 issue, p. 872-888, 2016.

Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinós, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., & Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. **Journal of Hydrology**, 534, 478–492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>

DISTRITO FEDERAL. (2009). Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009. **Aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal — PDOT e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/60298/Lei_Complementar_803_25_04_2009.html>. Acesso em: 01 jan. 2022.

DISTRITO FEDERAL. (2012). Lei Complementar nº 854, de 15 de outubro de 2012. **Atualiza a [Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009](#), que aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/72806/Lei_Complementar_854_15_10_2012.html>. Acesso em: 01 jan. 2022.

DISTRITO FEDERAL. (2021). Lei Complementar mº 986, de 30 de junho de 2021. **Dispõe sobre a Regularização Fundiária Urbana – Reurb no Distrito Federal, altera a Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, que aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências, e altera a Lei nº 5.135, de 12 de julho de 2013, que dispõe sobre alienação de imóveis na Vila Planalto e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.tc.df.gov.br/sinj/Norma/3e31558072eb4b7791ab7c55335ffd13/Lei_Complementar_986_30_06_2021.html>. Acesso em: 01 jan. 2022.

DISTRITO FEDERAL. (2021). Decreto 42269 de 06 de julho de 2021. **Regulamenta a Lei Complementar nº 986, de 30 de junho de 2021, que dispõe sobre a Regularização Fundiária Urbana – REURB no Distrito Federal.** Disponível em: <http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/dd64e5d58f8b4ec3b017006b3cccbbf8/Decreto_42269_06_07_2021.html#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2042.269%2C%20DE%2006,Urbana%20%E2%80%93%20REURB%20no%20Distrito%20Federal.>. Acesso em: 01 jan. 2022.

Dias, N. De O., Machado, V. S., Junior, J. M., Osco, L. P., Ramos, A. P. M., Morphometric Analysis ff Watershed Using Different Digital Surface Models, [http://journal.unoeste.br/index.php/ca/indexDOI: 10.5747/ce.2019.v11.n4.e294ISSN online 2178-8332Submetido: 16/08/2019Revisado:22/08/2019 Aceito: 27/08/2019Colloquium Exactarum](http://journal.unoeste.br/index.php/ca/indexDOI:10.5747/ce.2019.v11.n4.e294ISSNonline2178-8332Submetido:16/08/2019Revisado:22/08/2019Aceito:27/08/2019ColloquiumExactarum).

Dong, B., Xia, J., Zhou, M., Li, Q., Ahmadian, R., & Falconer, R., A. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles. **Science of the Total Environment**. 2022.

Elaboração prévia de microdrenagem para Villa Cauhy – DF. 2017. 31 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2017.em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2018.

ERENA, S. H.; WORKU, H.; DE PAOLA, F. Flood hazard mapping using FLO-2D and local management strategies of Dire Dawa city, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, n. September, p. 224–239, 2018.

ERSKINE, M. A; GREGG, D. G. Utilizing Volunteered Geographic Information to Develop a Real-Time Disaster Mapping Tool : A Prototype and Research Framework Utilizing Volunteered Geographic Information to Develop a. **International Conference on Information Resources Management**, p. 1–14, 2012.

ESCOBAR, M. P.; DEMERITT, D. Flooding and the framing of risk in British broadsheets, 1985–2010. **Public Understanding of Science**, 23 issue, p. 454-471, 2012.

FANG, J. et al. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. **Atmospheric Research**, 2019.

FILENI, F. DE M.; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. DE M. A. The application of LIDs in Savanna region for mitigation of flooded areas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. i, p. 1–12, 2019.

FLO-2D Software, Inc. Versão 2019. Disponível em: <https://flo-2d.com/>.

FLO-2D. **FLO-2D Reference Manual, 2021**. [s.l: s.n.].

FLO2D. **Storm Drain Manual, 2021**. [s.l: s.n.].

Follum, M. L. (2012). AutoRoute Rapid Flood Inundation Model. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IV-88, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory., March.

Frédéric Satgé, Yawar Hussain, Marie-Paule Bonnet, Babar M. Hussain, Hernan Martinez-Carvajal, Gulraiz Akhter and Rogério Uagoda. Benefits of the Successive GPM Based Satellite Precipitation Estimates IMERG–V03, –V04, –V05 and GSMaP–V06, –V07 Over Diverse Geomorphic and Meteorological Regions of Pakistan. **Remote Sensing**, 2018.

Gabriel Araújo e Silva e Gustavo Cezar de Carvalho. **Sistema de drenagem das quadras QSE Taguatinga Sul/DF: Estudo preliminar e propostas de medidas de controle**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. (Engenharia Civil) - Universidade Católica de Brasília.

GAITAN, S., VELDHUIS, M-C., GIESEN N., V. Spatial Distribution of Flood Incidents Along Urban Overland Flow-Paths. **Water Resour Manage**. 2015.

Gauch, H. (1982). *Multivariate Analysis in Community Ecology* (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511623332

GEBREMEDHIN, E. T. et al. Crowdsourcing and interactive modelling for urban flood management. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 2, p. 1–15, 2020.

Geng, Haopeng, Pan, Baotian, Huang, Bo, Cao, Bo, Gao, Hongshan, The spatial distribution of precipitation and topography in the Qilian Shan Mountains, northeastern Tibetan Plateau, **Geomorphology** (2017), doi:10.1016/j.geomorph.2017.08.050

GLENIS, V.; KUTIJA, V.; KILSBY, C. G. A fully hydrodynamic urban flood modelling system representing buildings, green space and interventions. **Environmental Modelling and Software**, v. 109, n. August, p. 272–292, 2018.

Godyn, I.; Muszynski, K.; Grela, A. Assessment of the Impact of Loss-of-Retention Fees on Green Infrastructure Investments. **Water** 2022, 14, 560. <https://doi.org/10.3390/w14040560>

GOMES, R., A., T.; GUIMARÃES, R., F.; CARVALHO, O., A.; FERNANDES, N., F., AMARAL, E., V. Combining Spatial Models for Shallow Landslides and Debris-Flows Prediction. **Remote Sensing**. 2013. doi:10.3390/rs5052219.

GONZALEZ-RAMIREZ, N.; NARDI, F.; O'BRIEN, J. S. Predicting Accurate Urban Flooding from Nuisance Flows to Major Disasters. v. 3, p. 818–808, 2018.

H., Sidek, L. M., Basri, H., Saidin, S., & Hassan, A. J. (2017). Evaluation of Difference Mesh Size for Overland Routing Model Wan. Evaluation of Difference Mesh Size for Overland Routing Model Wan.

HAGGETT, P. & CHORLEY, R. J. (1967) Models, paradigmes and the new geography. IN: CHORLEY, R. J. & HAGGETT, P. (Eds) Models In Geography. Methuen, London, pp. 19-41.

HARVEY, D. W. (1969) Explanation in geography. Ed. Arnold, London, 521p

HOCH, J. M. et al. Integrating large-scale hydrology and hydrodynamics for nested flood hazard modelling from the mountains to the coast. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, n. March, p. 1–18, 2019.

HU, M., Sayama, T., Zhang, X., Tanaka, K., Takara, K., Yang, H., Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China. **Journal of Environmental Management**. V. 193, p 430-438. 2017.

Huang, X., Liu, J., Zhang, Z., Fang, G., & Chen, Y. (2019). Assess river embankment impact on hydrologic alterations and floodplain vegetation. **Ecological Indicators**, 97(May 2018), 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.039>

Hultquist, C., Cervone, G. Integration of Crowdsourced Images, USGS Networks, Remote Sensing, and a Model to Assess Flood Depth during Hurricane Florence. **Remote Sensing**, v. 12, p. 834, 2020.

G. Bruni, R. Reinoso, N. C. Van de Giesen, F. H. L. R. Clemens, and J. A. E. Ten Veldhuis, “On the sensitivity of urban hydrodynamic modelling to rainfall spatial and temporal resolution,” **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 19, no. 2, pp. 691–709, 2015.

Geoportal/DF. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Distrito Federal- IDE/DF**. 2021. Disponível em: <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>. Acessado em: 06/11/2021

Jafarzadegan, K., & Merwade, V. (2019). Probabilistic floodplain mapping using HAND-based statistical approach. **Geomorphology**, 324, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.024>

Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., & Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. **Journal of Hydrology**, 564, 1085–1098. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.064>

JANG, J.; CHANG, T.; CHEN, W. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation. **Journal of Hydrology**, v. 562, n. April, p. 168–180, 2018.

JIANG, L.; BAUER-GOTTWEIN, P. How do GPM IMERG precipitation estimates perform as hydrological model forcing? Evaluation for 300 catchments across Mainland China. **Journal of Hydrology**, v. 572, n. August 2018, p. 486–500, 2019.

Jodhani, K. H., Patel, D., & Madhavan, N. (2021). A review on analysis of flood modelling using different numerical models. **Materials Today: Proceedings**. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.405>

Kankanamge et. al. Can volunteer crowdsourcing reduce disaster risk? A systematic review of the literature. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 35, p. 101097, 2019.

KIM, B. et al. Urban flood modeling with porous shallow-water equations: a case study of model errors in the presence of anisotropic porosity To cite this version: v. 523, p. 680–692, 2015.

Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. **Geomorphology**, v. 325, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>.

Leandro, J., Schumann, A., & Pfister, A. (2016). A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling. **Journal of Hydrology**, v. 535, 356–365.

LEITÃO, P.; MOY, M.; VITRY, D. The potential of proxy water level measurements for calibrating urban pluvial flood models. **Water Research**, v. 175, 2020.

Lhomme, J., & Sayers, P. (2008). Recent development and application of a rapid flood spreading method Recent development and application of a rapid flood spreading method. October. <https://doi.org/10.1201/9780203883020.ch2>

LI, B. et al. Quantifying the effects of climate variability, direct and indirect land use cover change , and human activities on runoff. **Journal of Hydrology**, p. 124684, 2020.

Li, W., Lin, K., Zhao, T., Lan, T., Chen, X., Du, H., & Chen, H. (2019). Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and

Li, X., O, S., Wang, N., Liu, lichen, & Huang, Y. (2021). Evaluation of the GPM IMERG V06 products for light rain over Mainland China. **Atmospheric Research**, 253, 105510.

LIMA C., C., et al., Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos, com o Suporte de Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. Vol. 42, p. 378-394. 2019.

LIMA, D. F. **Avaliação da conformidade dos dados de precipitação do GPM (Global Precipitation Measurement) com estações pluviométricas no estado de São Paulo em 2017 avaliação da conformidade dos dados de precipitação do GPM (Global Precipitation Measurement)** UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, 2019.

LIN, P.-S.; LEE, J.; CHANG, C. An application of the FLO-2D model to debris-flows simulation-A case study of Song-Her district in Taiwan. **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**, v. 3, n. 6, p. 947–956, 2011.

LIU, Z.; MERWADE, V. Accounting for model structure, parameter and input forcing uncertainty in flood inundation modeling using Bayesian model averaging. **Journal of Hydrology**, v. 565, n. July, p. 138–149, 2018.

LOAT, R.; PETRASCHECK, A. *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. 1997.

Luísa Carolina Silva Lelis, Raoni Wainer Duarte Bosquilia, Sergio Nascimento Duarte. Assessment of Precipitation Data Generated by GPM and TRMM Satellites. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, 153-163, 2018

MAGGIONI, V.; MASSARI, C.; STATES, U. the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling : A review. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 214–224, 2018.

Maia, Andreza Cavalcante; Pereira, Nathália Livya Bento. **Estudo do sistema de drenagem urbana na região administrativa do Riacho Fundo I – DF**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2018.

MAIA, D.C. Caracterização das enchentes na área urbana de Ribeirão Preto (SP): um enfoque através de notícias de jornal. **Geografia, Rio Claro**, v.34, n. 2, p. 307-327, 2009.

Molinari, D., De Bruijn, K. M., Castillo-Rodríguez, J. T., Aronica, G. T., & Bouwer, L. M. (2018). Validation of flood risk models: Current practice and possible improvements. **International Journal of Disaster Risk Reduction**. doi:10.1016/j.ijdr.2018.10.022

MAMODU ADEGBE; DINAND ALKEMA; VICTOR G. JETTEN; AKO THOMAS AGBOR; IDRIS NDA ABDULLAHI; ONODUKU USMAN SHEHU; ABRAHAM. Post Seismic Debris Flow Modelling Using Flo-2D ; Case Study of Yingxiu , Post Seismic Debris Flow Modelling Using Flo-2D ; Case Study of Yingxiu , Sichuan Pronvince , China. **Journal of Geography and Geology**, n. June, 2013.

Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito
Volume 1 – Sinalização Vertical de Regulamentação
Autor: Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN
Ano: 2007

Marco J.B., Cayuela A. (1994) Urban flooding: the flood-planned city concept. In: Rossi G., Harmancioğlu N., Yevjevich V. (eds) Coping with Floods. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences), vol 257. Springer, Dordrecht.

MARQUES, G. S.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. **Manejo de águas pluviais: estudo da rede de drenagem e de soluções de baixo impacto na região administrativa Candangolândia**. Simpósio sobre sistemas Sustentáveis, n. December, 2019.

MARRA, F. et al. Precipitation frequency analysis from remotely sensed datasets: A focused review. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 699–705, 2019.

MARTINS, É. et al. Evolução geomorfológica do Distrito Federal. **Documentos - EMBRAPA Cerrados (Brazil)**, p. 57, 2004.

MELSEN, L. A. et al. Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 1093–1104, 2019.

Melsen, L. A., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., Zappa, M., Mizukami, N., Mendoza, P. A., Clark, M. P., & Uijlenhoet, R. (2019). Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. **Journal of Hydrology**, 568, 1093–1104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.046>

Mignot, E., Li, X., & Dewals, B. (2018). Experimental modelling of urban flooding: A review. **Journal of Hydrology**, 568(March 2018), 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.001>.

Ministério do Planejamento e Orçamento. 1998. Glossário de Defesa Civil, Estudos de Riscos e Medicina de Desastres. Disponível em: <
<http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/GLOSARIO-Dicionario-Defesa-Civil.pdf>>. Acessado em: junho de 2021.

Mohammed, S. A., Hamouda, M. A., Mahmoud, M. T., and Mohamed, M. M.: Performance of GPM-IMERG precipitation products under diverse topographical features and multiple-intensity rainfall in an arid region, *Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences*. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2019-547>, 2020.

Molinari, D.; Mazuran, M.; Arias, C.; Minucci, G.; Atun, F.; Ardagna, D. Implementing tools to meet the Floods Directive requirements: a “procedure” to collect, store and manage damage data in the aftermath of flood events. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, v. 184, 2014. DOI: 10.2495/FRIAR140181.

Moy de Vitry, M., & Leitão, J. P. (2020). The potential of proxy water level measurements for calibrating urban pluvial flood models. *Water Research*, 115669. doi:10.1016/j.watres.2020.115669

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282–290, 1970.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282–290, 1970.

NEGLIA, F. et al. Shallow-water models for volcanic granular flows: A review of strengths and weaknesses of TITAN2D and FLO2D numerical codes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 410, p. 107146, 2021.

NKWUNONWO, U. C.; WHITWORTH, M.; BAILY, B. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, v. 7, p. e00269, 2020.

NUNES, L. H. O papel da mídia na difusão da informação climática: o El Niño de 1997-98. *Geografia. Rio Claro: AGETEO*, v. 32 n. 1, jan./abr. 2007.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two-DIMENSIONAL WATER FLOOD AND MUDFLOW SIMULATION. *Sciences-New York*, v. 146, n. 2, p. 139–146, 1994.

OLIVEIRA, Francisca Leiliane de Sousa. Indicadores de Vulnerabilidade e Risco Local: O caso do município de Pacoti. 2018. 223 f. **Tese** (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual do Ceará. – Fortaleza, CE: il.

Olivera, F., & DeFee, B. B. (2007). Urbanization and Its Effect On Runoff in the Whiteoak Bayou Watershed, Texas1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 43(1), 170–182. doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00014.x

PAQUIER, A.; MIGNOT, E.; BAZIN, P. From hydraulic modelling to urban flood risk. **Procedia Engineering**, v. 115, n. i, p. 37–44, 2015.

PARANAYBA, G. R. et al. **Modelagem da drenagem urbana no distrito federal - estudo de caso do reservatório de detenção do Guará. XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS MODELAGEM**, n. December, 2019.

PAULA, A. C. V. DE; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Monitoramento hidrológico de uma lagoa de deteno no monitoramento hidrológico de uma lagoa de deteno no Guará / DF. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS MONITORAMENTO**, n. December, 2019

PDDU, 2009. Concremat Engenharia. Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras, Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal- Manual Técnico 2 e 3– Manual Técnico de Drenagem Urbana – 2009. V.2

PINS, J.; TIMBE, L. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. **Water Science and Engineering**, 2019.

PINTO, YGOR JOSIAS DE OLIVEIRA; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. DE M. A. **MODELAGEM DA DRENAGEM URBANA – ESTUDO DE CASO NA REDE URBAN DRAINAGE MODELING – CASE STUDY AT ASA NORTE. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2017.

PRADHAN, R., K. Review of GPM IMERG performance: A global perspective. **Remote Sensing of Environment**. 2022.

PRINCE GEORGE’S COUNTY – MARYLAND (1999). Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach. Maryland: Department of Environmental Resources. 150 p. (Disponível em <ftp://lowimpactdevelopment.org/pub>).

QuantumGis. Qgis, Versão 3.18. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html.

RASHID, A. A. et al. Calibrating a High-Performance Hydrodynamic Model for Broad-Scale Flood Simulation: Application to Thames Estuary, London, UK. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 967–974, 2016.

Ren, X., Hong, N., Li, L., Kang, J., & Li, J. (2020). Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process. **Geoderma**, 363, 114158.

ROCHA, H. L.; KOBİYAMA, M.; MICHEL, G. P. APLICAÇÃO DO MODELO FLO FLO-2D 2D PARA SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO CUNHA , RIO DOS CEDROS / SC. **XI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, p. 1–20, 2014.

ROCHA, M. A. da. (2019). **Paisagem urbana integrada às técnicas compensatórias de drenagem: solução para os alagamentos em Brasília**. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196p.

Saksena, S., Merwade, V., & Singhofen, P. J. (2019). Flood inundation modeling and mapping by integrating surface, subsurface and river hydrodynamics. **Journal of Hydrology** (in Revision). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.024>

SALES, Anna Carolina Montenegro Nunes. **Metodologia para definição de projeto para um sistema de drenagem pluvial urbana sustentável com estudo de caso**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2018.

SALLES, L. et al. Seasonal effect on spatial and temporal consistency of the new GPM-based IMERG-v5 and GSMaP-v7 satellite precipitation estimates in Brazil's Central Plateau region. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 2019.

Salvadore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of Hydrology**, 529, 62–81.

SANTOS, J., M., & PAULA, D., P., Análise Espacial das Ocorrências de Alagamentos Urbanos na Microbacia do Riacho Pajeú em Fortaleza, Ceará. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium**. v. 12, n. 1, p. 109-128. 2021.

SANTOS, J., S., CARVALHO, S., M. Ocorrências de alagamentos e enchentes na bacia do arroio da Ronda em Ponta Grossa, PR, Brasil. **TerraPlural**. v.15. 2021.

SARTORI, Aderson. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. 161fl. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257875>>. Acesso em: 3 ago. 2018.

SAVANT, G. et al. Urban and overland flow modeling with dynamic adaptive mesh and implicit diffusive wave equation solver. **Journal of Hydrology**, v. 573, n. October 2018, p. 13–30, 2019.

SCHUBERT, J. E. et al. Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 12, p. 1603–1621, 2008.

See L (2019) A Review of Citizen Science and Crowdsourcing in Applications of Pluvial Flooding. *Front. Earth Sci.* 7:44. doi: 10.3389/feart.2019.00044

SENE, K. Urban Flooding. In: **Flash Floods**. [s.l: s.n.].

SERENCO SERVIÇOS DE ENGENHARIA CONSULTIVA. **Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal**. Distrito Federal: [s.n.]. v. Tomo IV-

SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO, SGB. Setorização de Áreas de Risco Geológico. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22910>;

Shao, Z., Fu, H., Li, D., Altan, O., & Cheng, T. (2019). Remote Sensing of Environment Remote sensing monitoring of multi-scale watersheds impermeability for urban hydrological evaluation. **Remote Sensing of Environment**, 232(July), 111338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111338>

Shen, J., Tan, F., 2020. Effects of DEM resolution and resampling technique on building treatment for urban inundation modeling: a case study for the 2016 flooding of the HUST campus in Wuhan. **Nat. Hazards** 104 (1), 927–957.

Shrestha, A., Mascaro, G., & Garcia, M. Effects of stormwater infrastructure data completeness and model resolution on urban flood modeling. **Journal of Hydrology**. **2022**.

SILVA, A., A., FRANCA, R., R., Identificação e Classificação de Episódios de Chuva Extrema no Distrito Federal – Período 1990-2019. **Espaço & Geografia**, vol.24, n.2. 2021.

SILVA, C. C. et al. **Modelagem da drenagem urbana – estudo de caso na sub- bacia da Asa Sul-DF**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1–8, 2017.

SILVA, Gabriel Araújo e; CARVALHO, Gustavo César de. **Sistema de drenagem das quadras QSE Taguatinga Sul / DF: estudo preliminar e propostas de medidas de controle**. 2017. 24 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2017.

SILVA, T. J. B. DA; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. DE M. A. **Avaliação da eficiência de bacias de detenção-setor avaliação da eficiência de bacias de detenção – Setor Habitacional Taquari – DF**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, n. December, 2017.

Silverman, B. W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. New York: Chapman and Hall, 1986.

Sjöman, J. D., & Gill, S. E. (2014). Residential runoff – The role of spatial density and surface cover, with a case study in the Højeå river catchment, southern Sweden. **Urban Forestry & Urban Greening**, 13(2), 304–314.

SOUZA, F. A. A. DE et al. Capítulo VI – Informações voluntárias na produção de conhecimento científico e gestão de desastres. In: **Riscos e desastres: caminhos para o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: [s.n.].

SOUZA, F.P. (2014). **Monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do Lago Paranoá - Brasília/DF - e avaliação de bacias de detenção**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-165/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139.

STEINKE, ERCÍLIA TORRES; BARROS, J. R. Tipos de tempo e desastres urbanos no Distrito Federal entre 2000 e 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, p. 1435–1453, 2015.

Subrina, S., & Chowdhury, F. K. (2018). Urban Dynamics: An undervalued issue for water logging disaster risk management in case of Dhaka city, Bangladesh. **Procedia Engineering**, 212, 801–808. doi:10.1016/j.proeng.2018.01.103

TAVEIRA, Priscila Lopes Soares da Costa. **Classificação de bacias hidrográficas do Distrito Federal utilizando análise multivariada de grupos para a definição de unidades territoriais básicas**. 2015. x, 50 f., il. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

TEIXEIRA, Bruna Soares; COSTA, Laís Alves. **Análise da drenagem na região da SQN 716 – Brasília/ DF e propostas de medidas de controle**. 2017. 29 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2017.

TENG, J. et al. Environmental Modelling & Software Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 90, p. 201–216, 2017.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 90, p. 201–216, 2017.

TEODORO, T. A. et al. Análise das Estimativas da Precipitação Diária do Produto GPM-IMERG na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, n. 2, p. 449–459, 2020.

TESEMA, D.; BIRHANU, B.; ABEBE, G. A review of flood modeAHlg methods for urban pluvial flood application. **Modeling Earth Systems and Environment**, n. 0123456789, 2020.

TSAKIRIS, G.; BELLOS, V. A Numerical Model for Two-Dimensional Flood Routing in Complex Terrains. **Water Resources Management**, v. 28, n. 5, p. 1277–1291, 2014.

URQUIZA, É. D. M. **AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO DO GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT COM ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – BRASIL EM 2017**. [s.l.: s.n.].

Vanelli, F. M., Fan, F. M., & Kobiyama, M. (2020). Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 17, e24. <https://doi.org/10.21168/reg.v17e24>.

VESTENA, L., R., ALMEIDA, D., E., F., GEFFER, E., Análise espacial e temporal da distribuição dos alagamentos e inundações na cidade de Guarapuava, Paraná. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n.5, p.24923-24941. 2020.

VICTORIA, G. F. A. D. DE C. **AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO GPM LATE RUN PARA ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NO BRASIL**. Gabriel Francioli Alves¹; Daniel de Castro Victoria 2 N° 20604. p. 1–8, 2020.

WAGHWALA, R. K.; AGNIHOTRI, P. G. Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, p. 101155, 2019.

WANG, Y. et al. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. **Environmental Modelling & Software**, v. 107, n. June, p. 85–95, 2018.

Wu, X., Wang, Z., Guo, S., Liao, W., Zeng, Z., & Chen, X. (2017). Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework:

A case study in Dongguan City, China. **Journal of Hydrology**, 547, 428–442.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.020>.

YANG, Y. et al. Linking a Storm Water Management Model to a Novel Two-Dimensional Model for Urban Pluvial Flood Modeling. **International Journal of Disaster Risk Science**, 2020.

ZENG, Z. et al. Integrating Internet media into urban flooding susceptibility assessment: A case study in China. **Cities**, v. 101, n. 1037, p. 102697, 2020.

Zhang, C., Fan, C., Yao, W., Hu, X., & Mostafavi, A., Social media for intelligent public information and warning in disasters: An interdisciplinary review. **International Journal of Information Management**. 2019.

ZHAO, G. et al. An enhanced inundation method for urban flood hazard mapping at the large catchment scale. **Journal of Hydrology**, 2019.

Zischg, A. P., Mosimann, M., Bernet, D. B., Zischg, A. P., Mosimann, M., Bernet, D. B., & Röthlisberger, V. (2017). Validation of 2D flood models with insurance claims. **Journal of Hydrology**, December. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.042>

Ward, P. J., de Ruiter, M. C., Mård, J., Schröter, K., Van Loon, A., Veldkamp, T., ... Wens, M. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. **Water Security**, 11, 100070. doi:10.1016/j.wasec.2020.1000

W. Zhang e DR Montgomery, “Digital altitude model grid size, Landscape Representation, and hydrologic simulations,” *Water Resources Research*, vol. 30, não. 4, pp. 1019-1028

APÊNDICE A: EXTENSÃO DA MANCHA ALAGADA PARA DIFERENTE TEMPO DE RETORNO

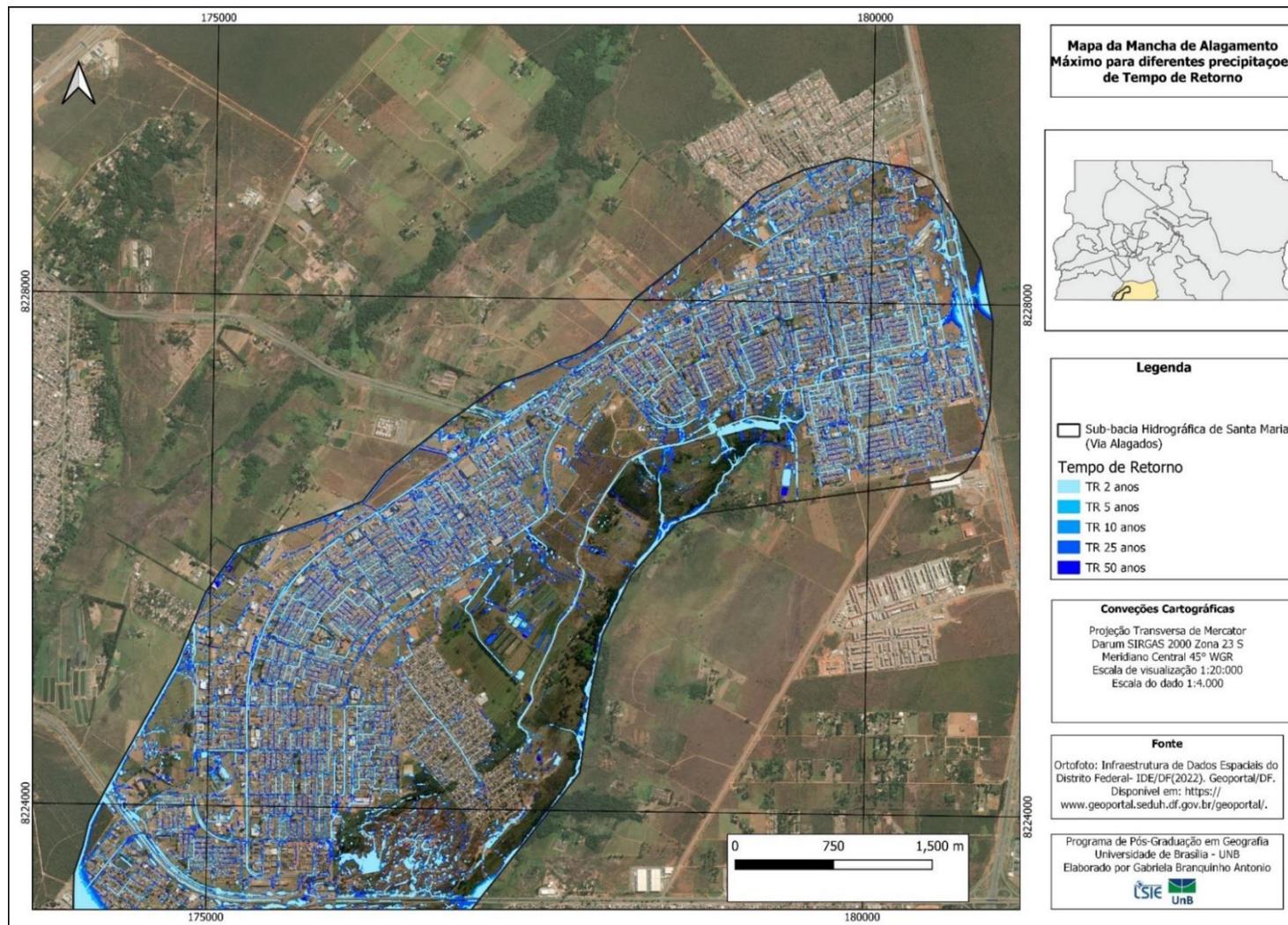


Figura 107 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Santa Maria - DF

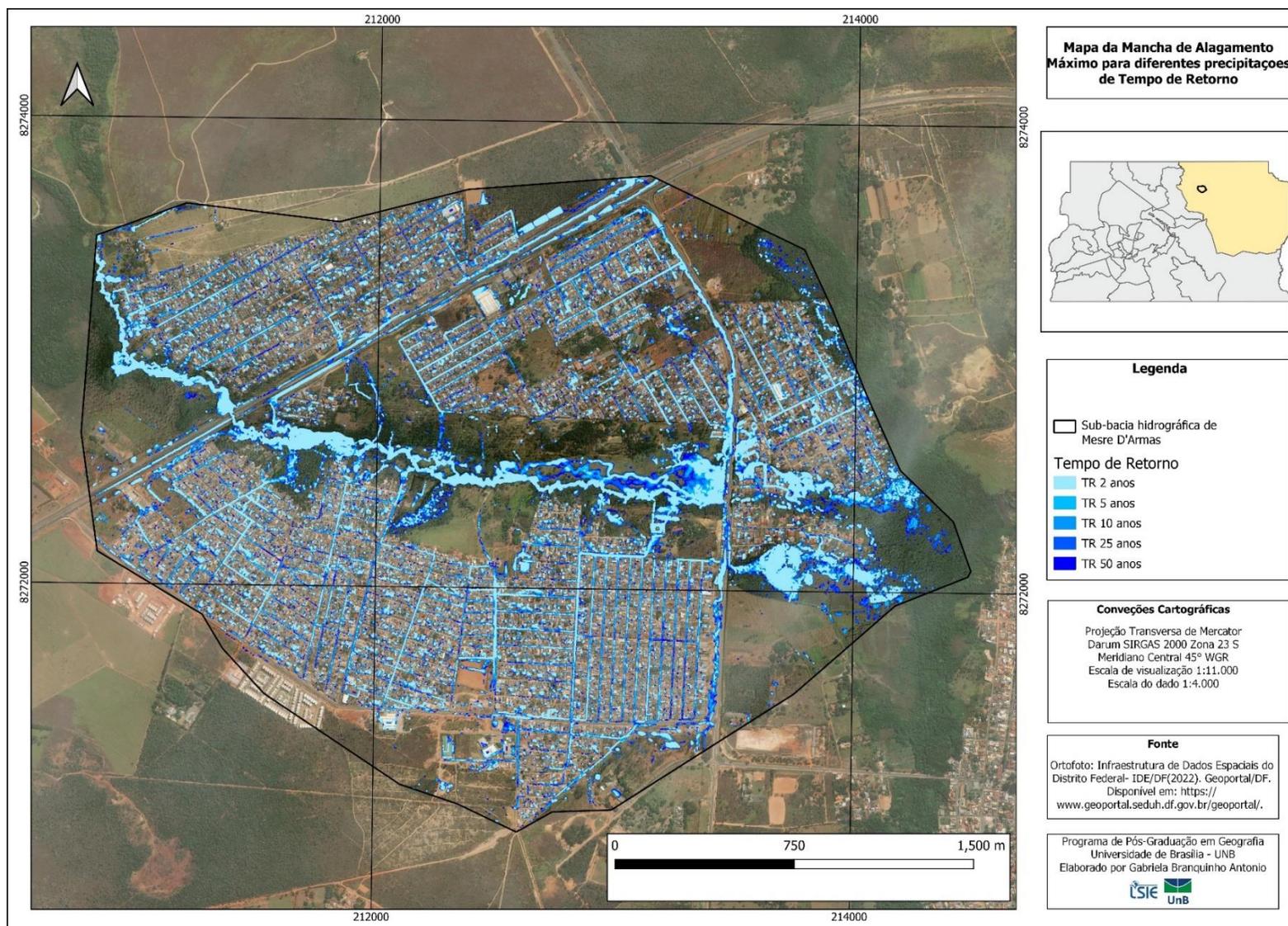


Figura 108 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Mestre D'Armas - DF

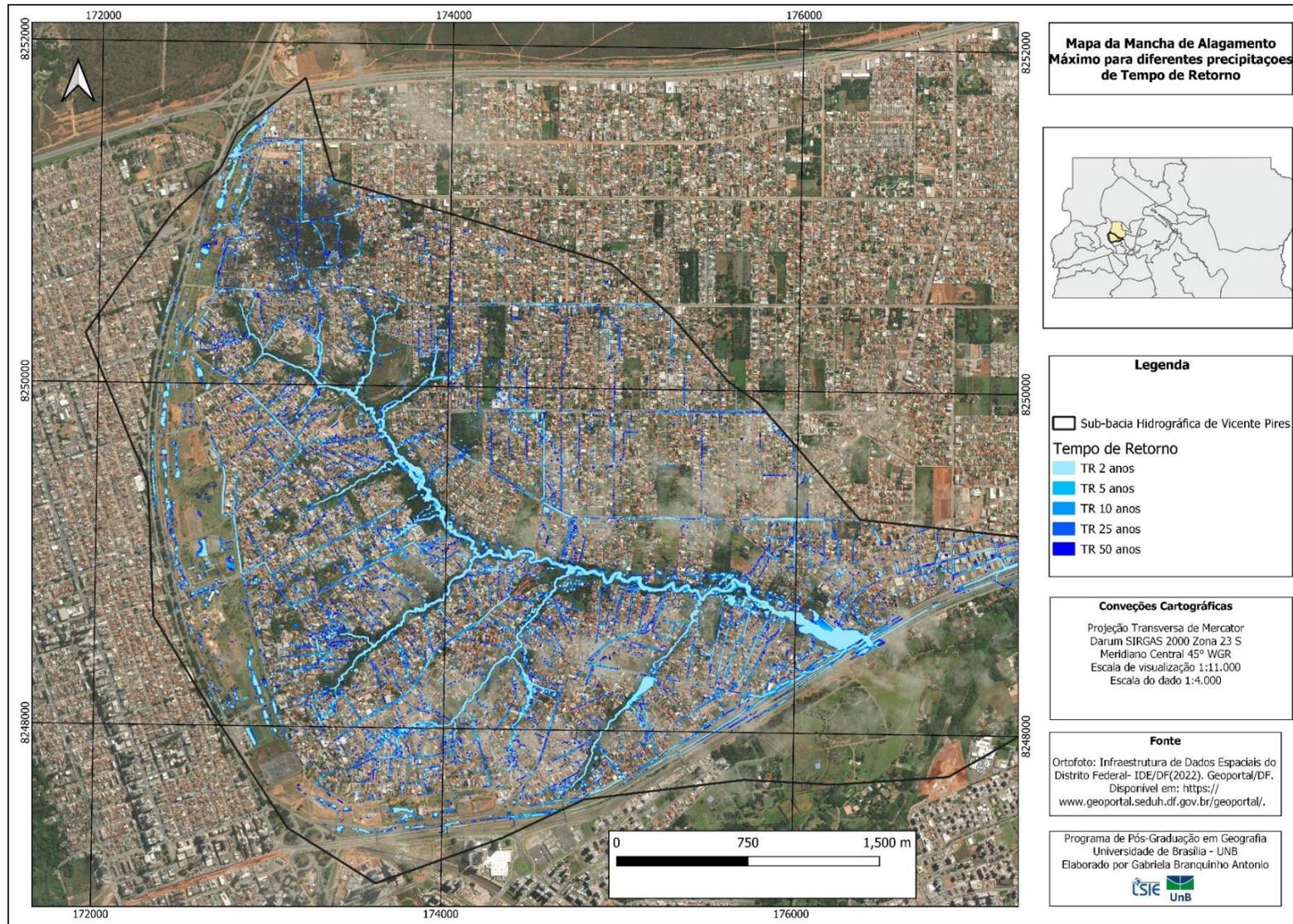


Figura 109 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Vicente Pires - DF

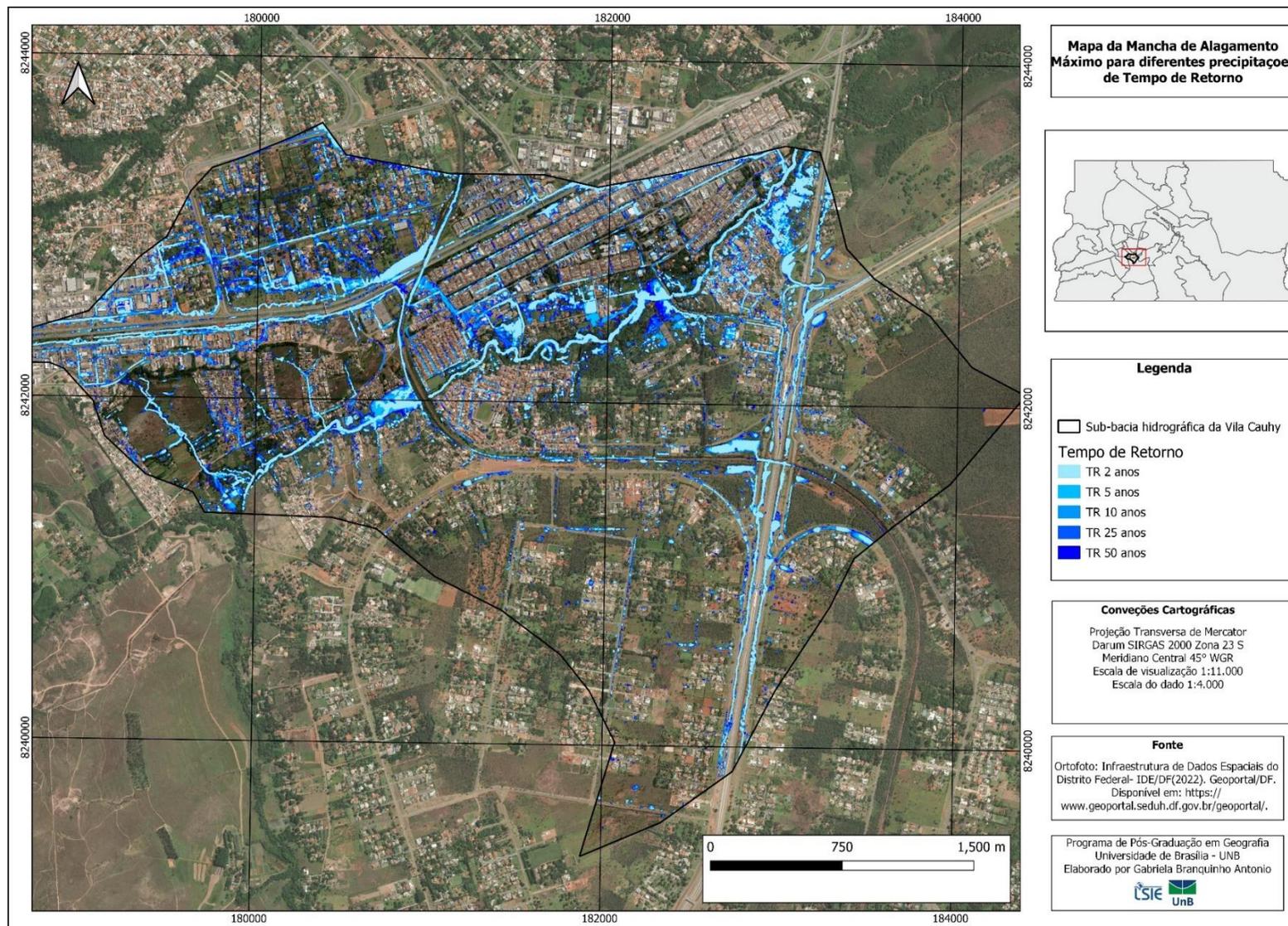


Figura 110 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica da Vila Cauhy - DF

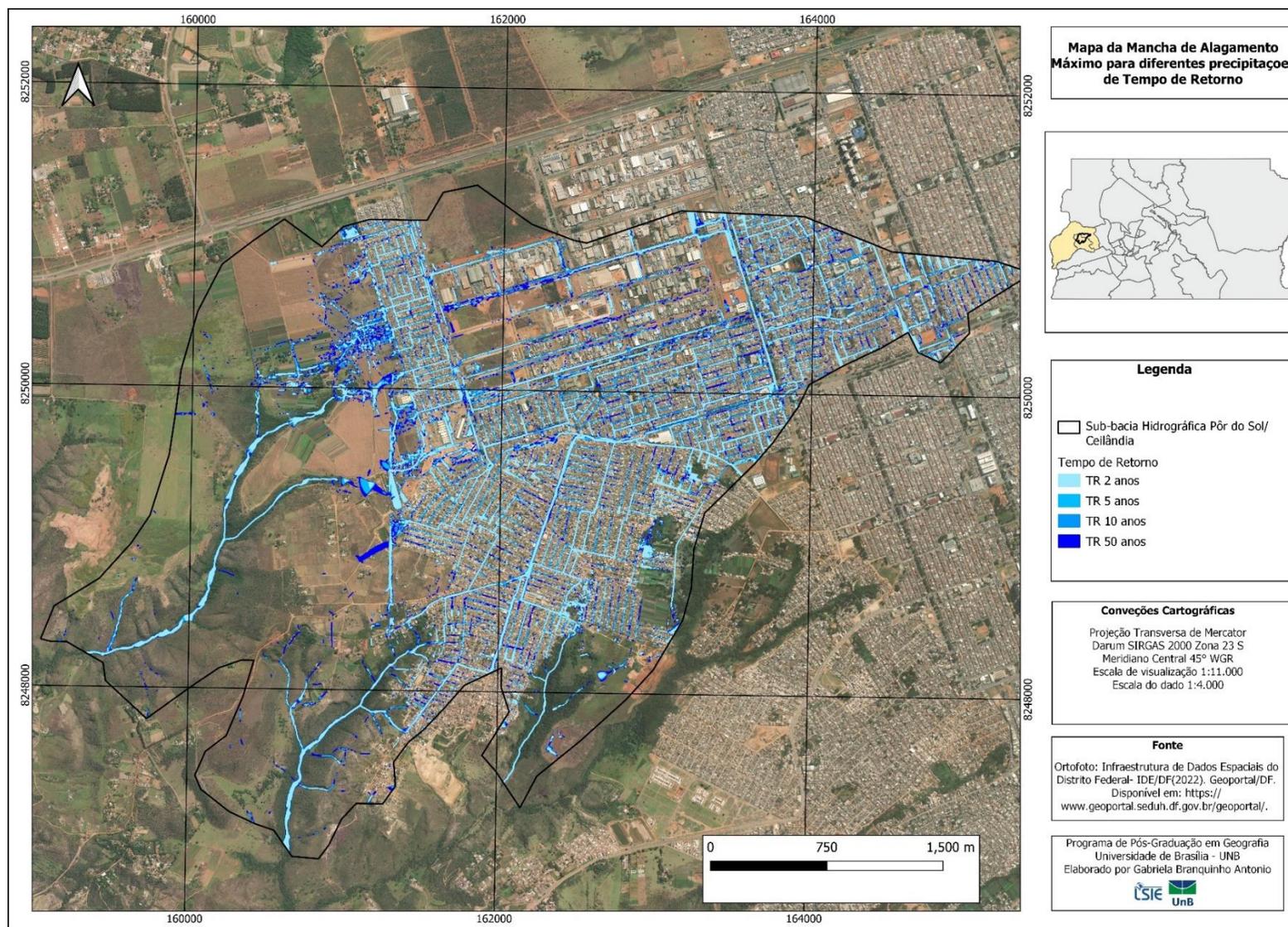


Figura 111 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Pôr do Sol/Sol Nascente-Ceilândia – DF

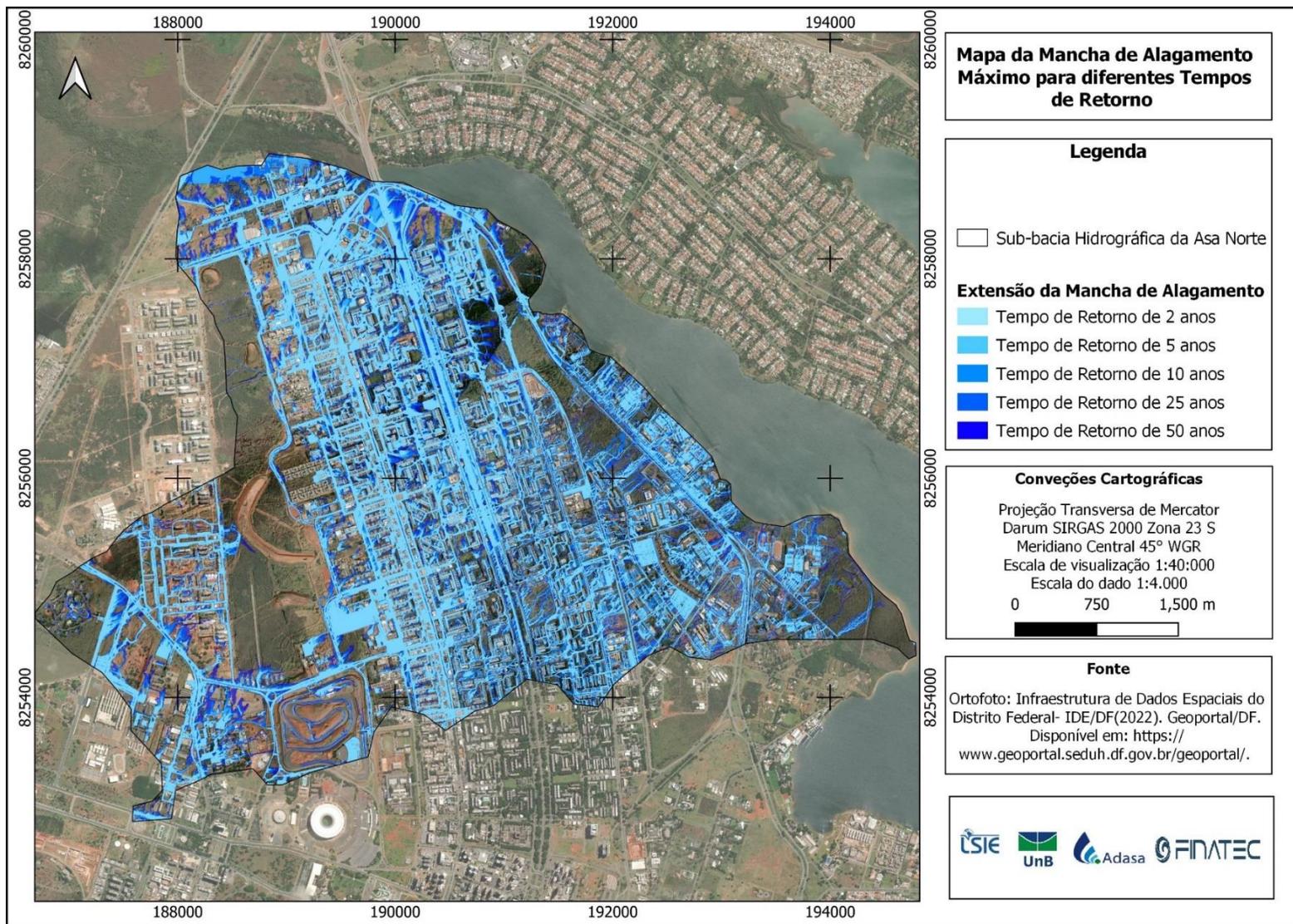


Figura 112 - Mancha alagada máxima para precipitações de diferentes tempos de retorno, para a sub-bacia hidrográfica de Asa Norte, Plano Piloto – DF

APÊNDICE B: ALTURA DA LÂMINA DE ÁGUA MÁXIMA (M) – ASA NORTE / PLANO PILOTO - DF

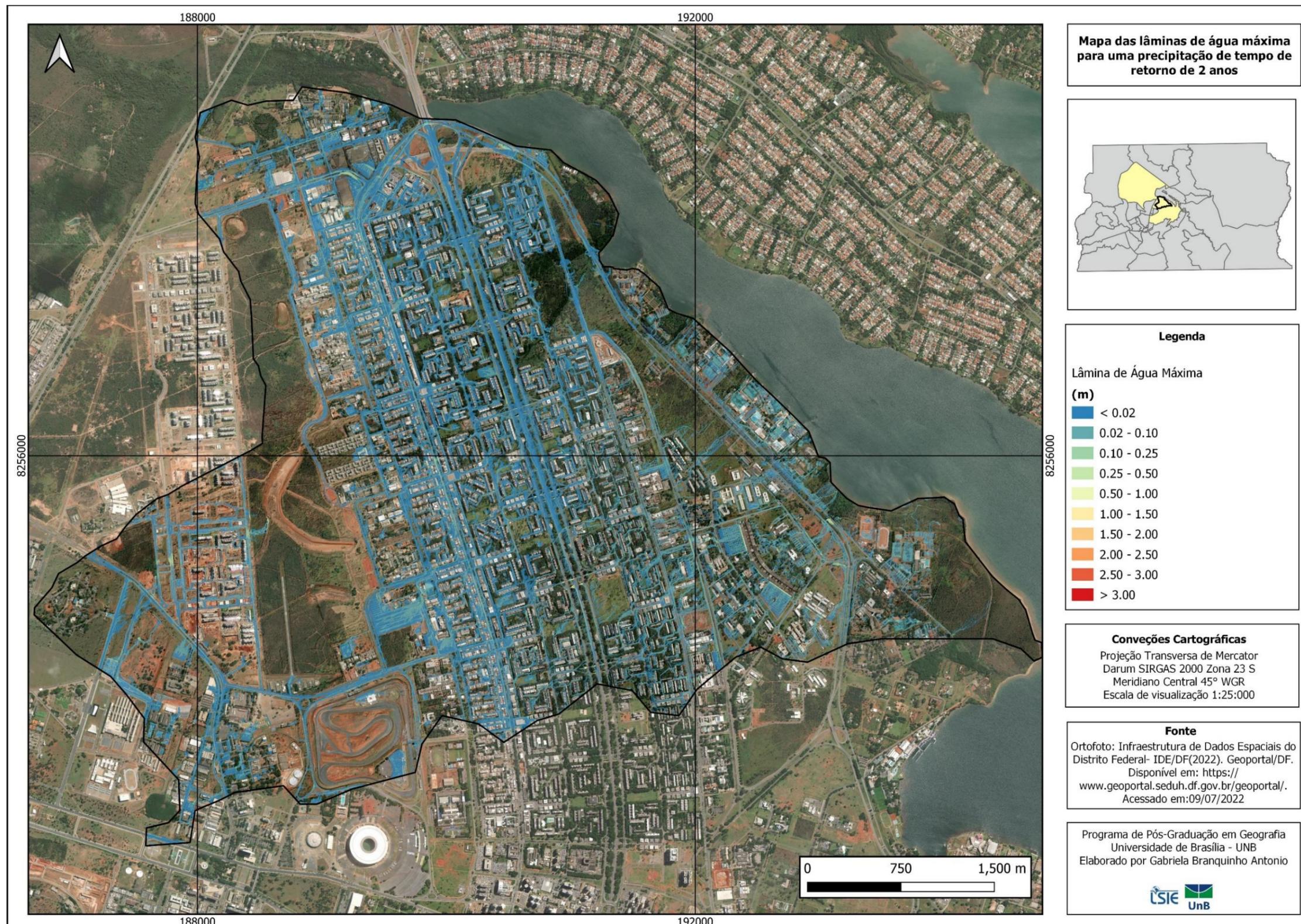


Figura 113 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

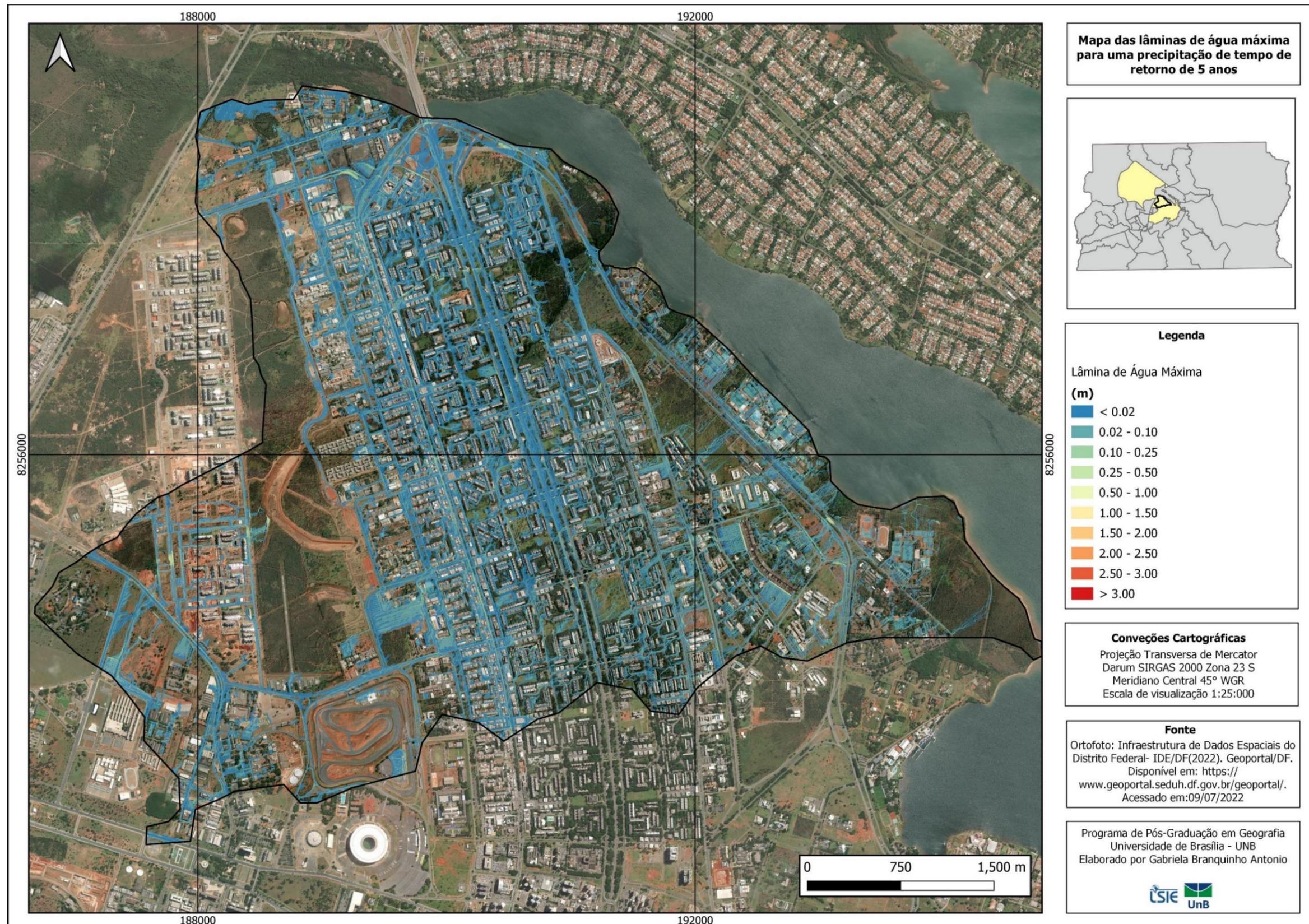


Figura 114 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

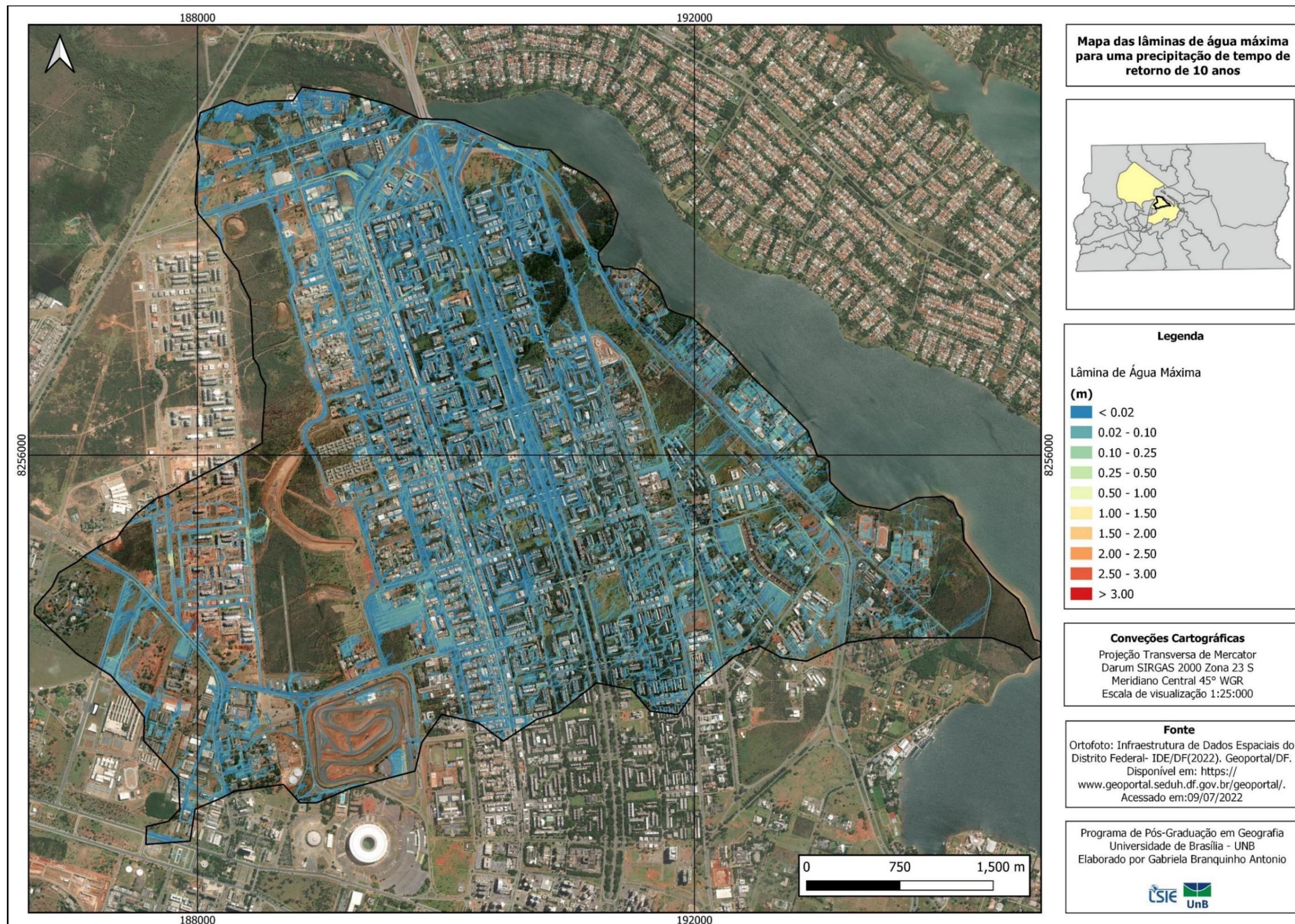


Figura 115 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

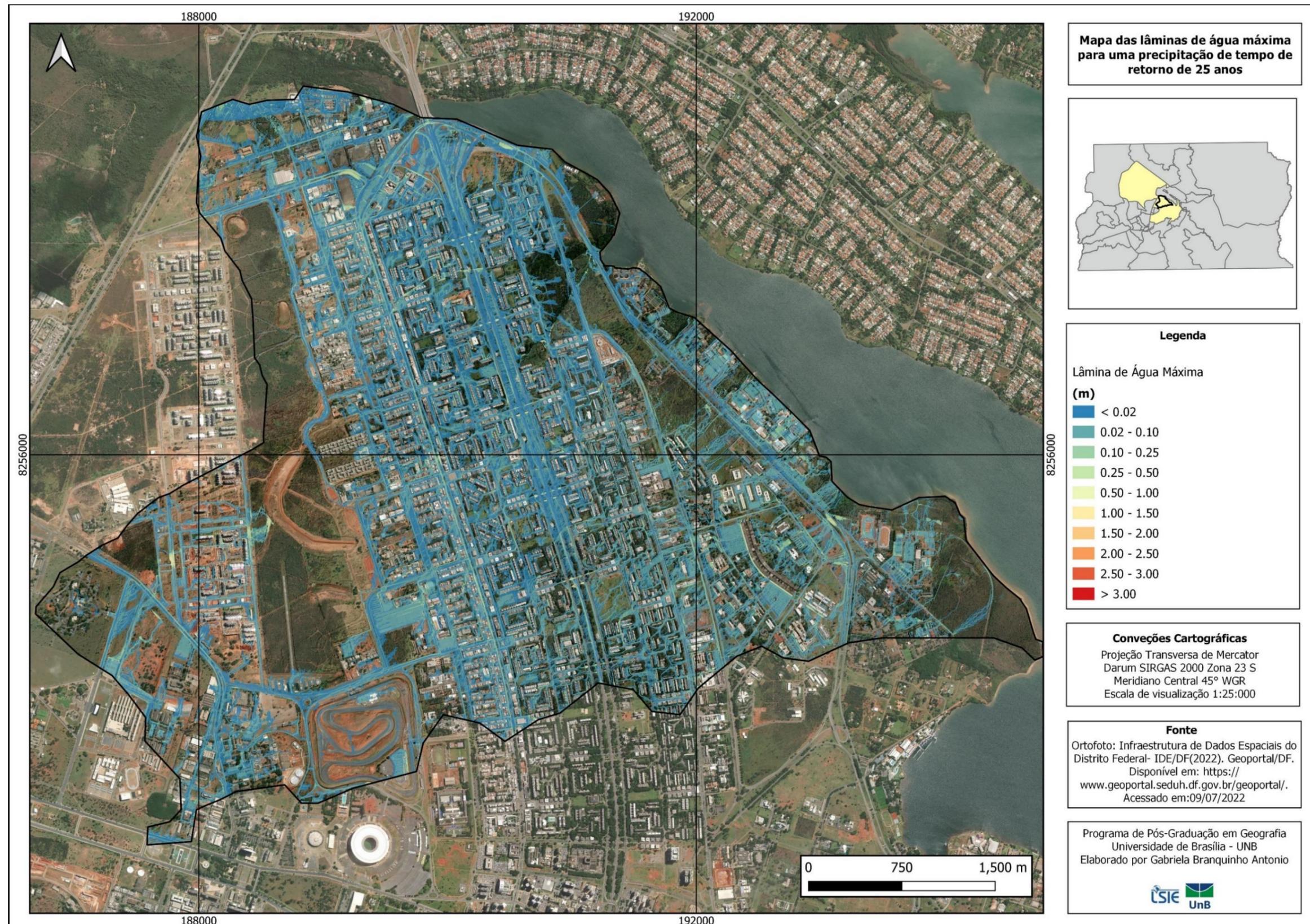


Figura 116 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

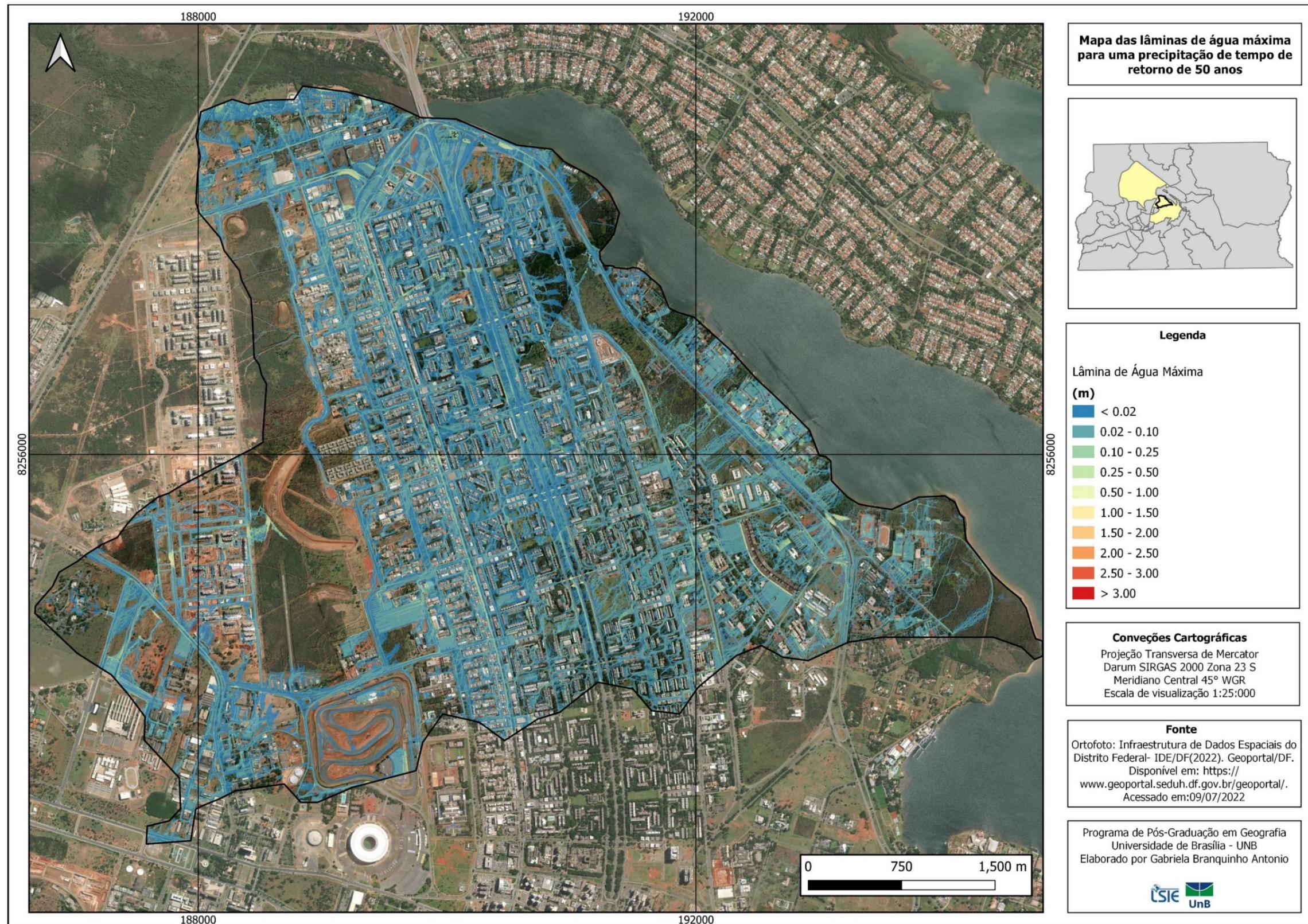


Figura 117 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

APÊNDICE C: SANTA MARIA NO ENTORNO DA VIA ALAGADOS – LÂMINA DE ÁGUA MÁXIMA (M)

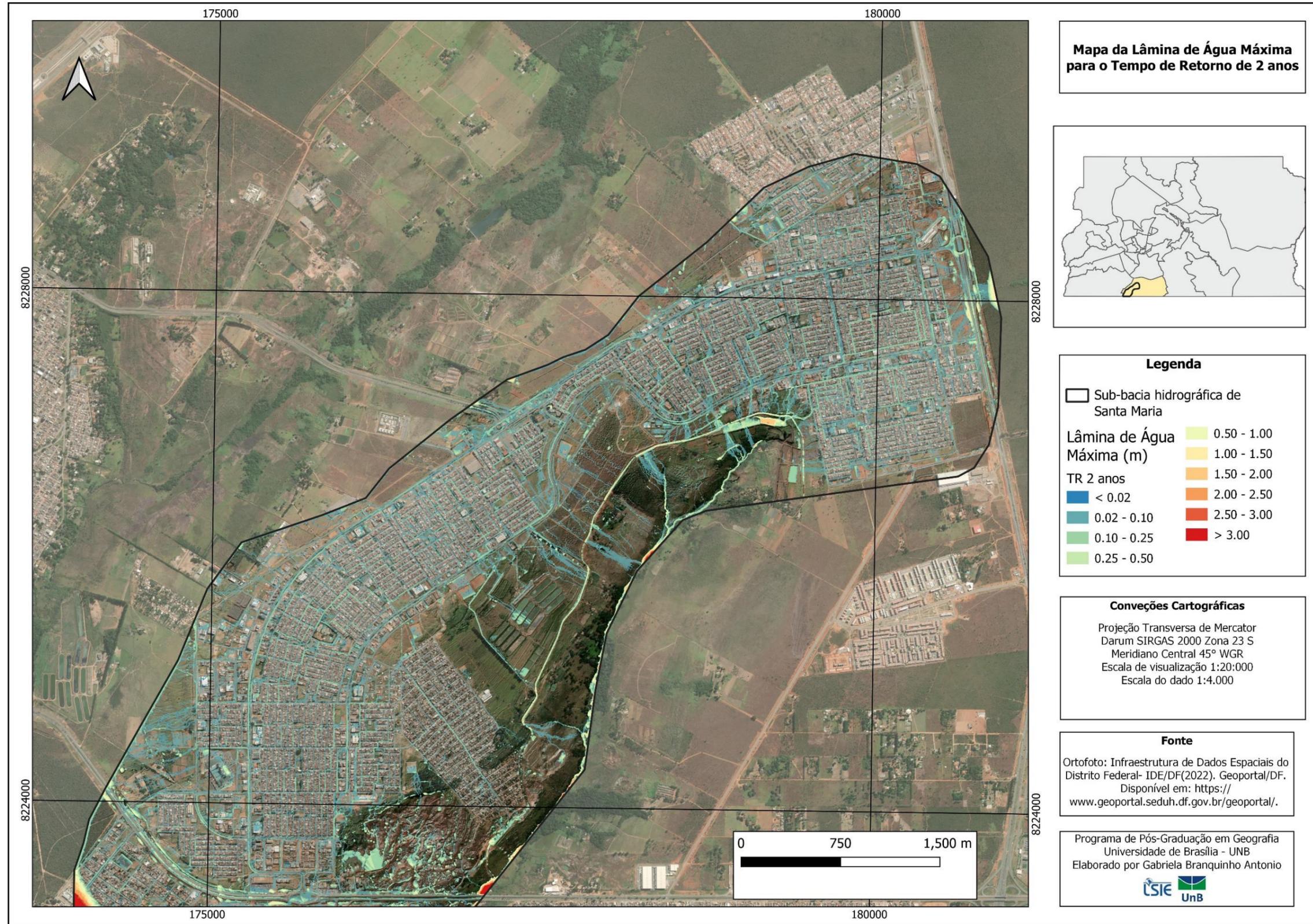


Figura 118 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

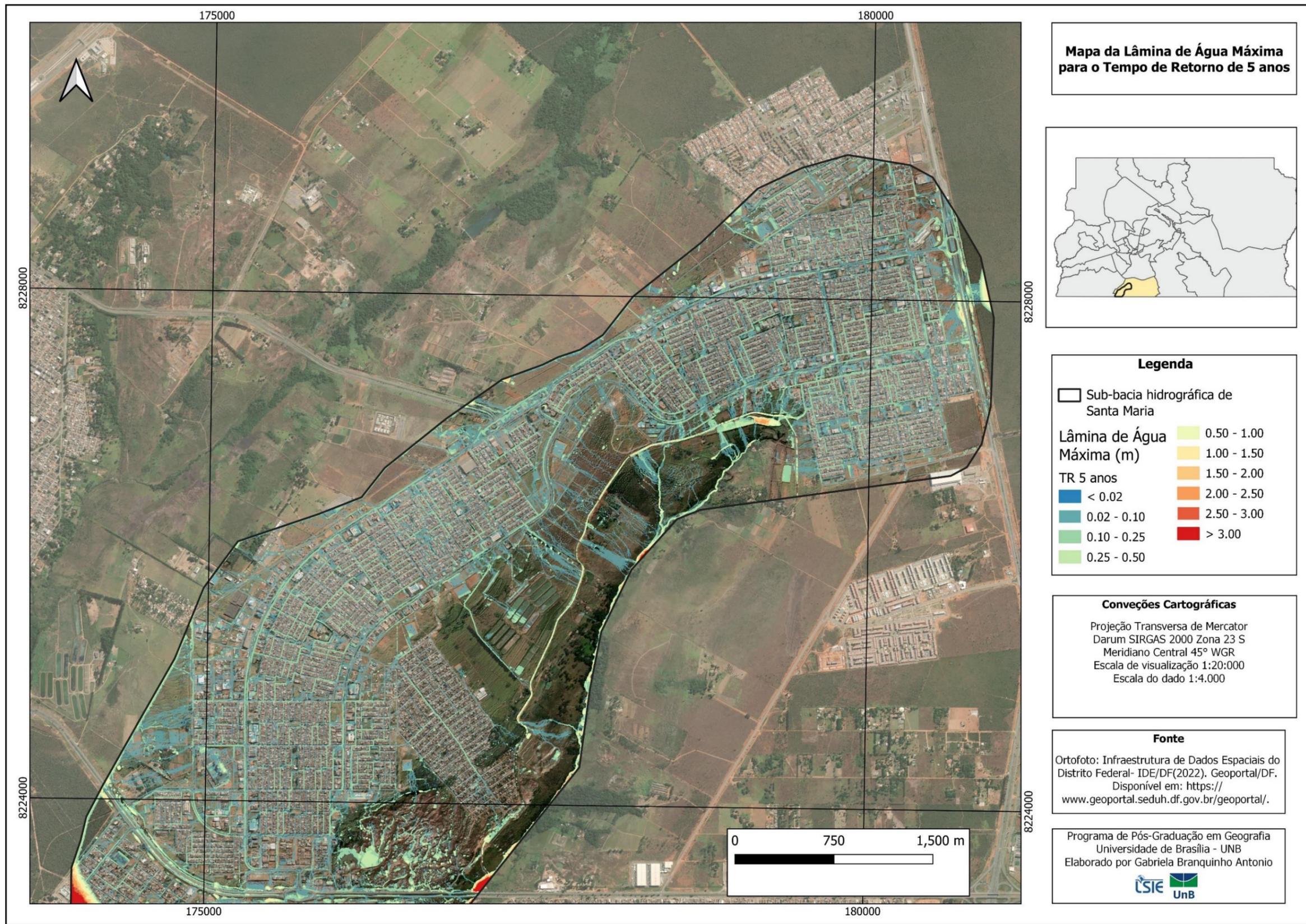


Figura 119 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

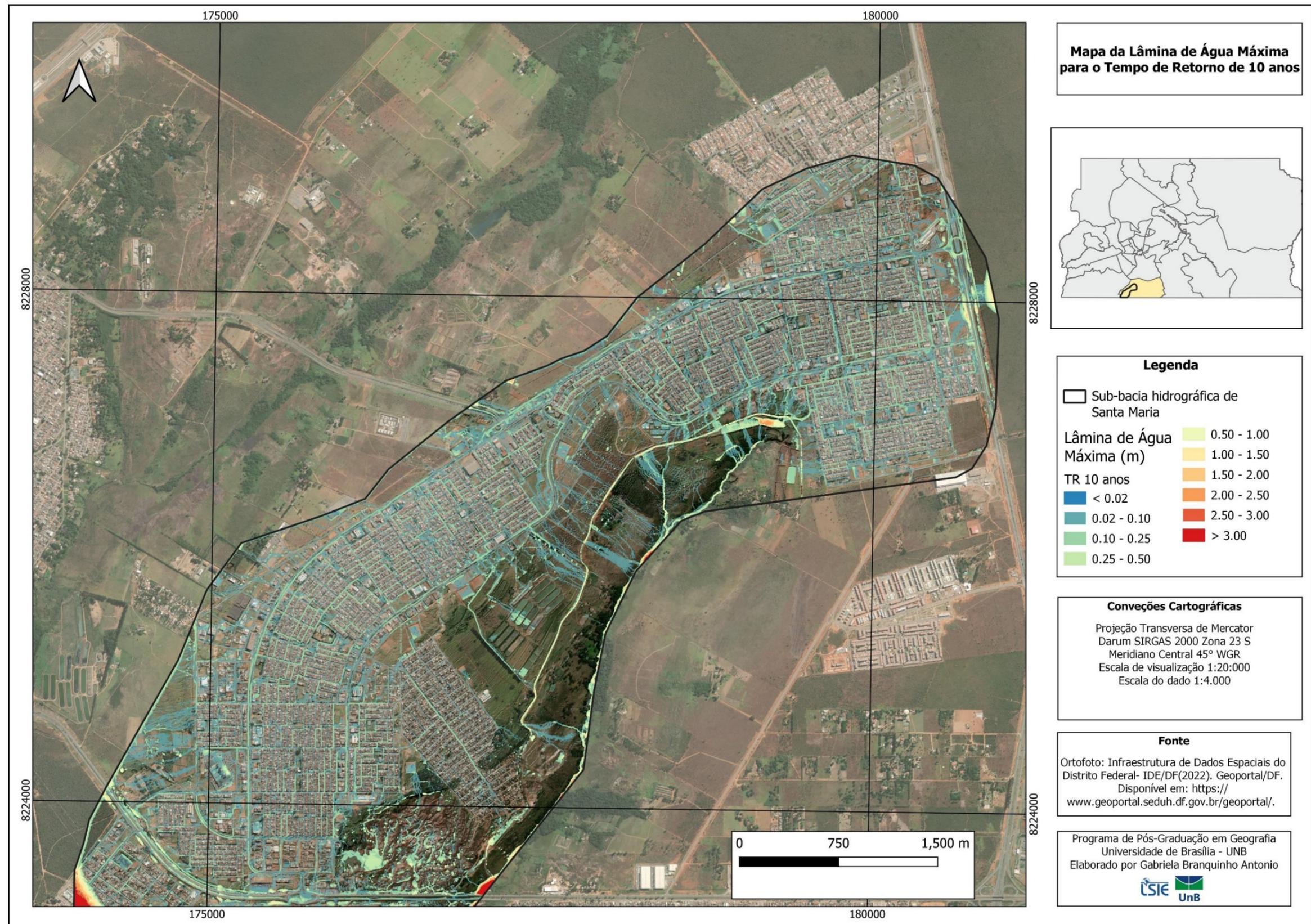


Figura 120 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

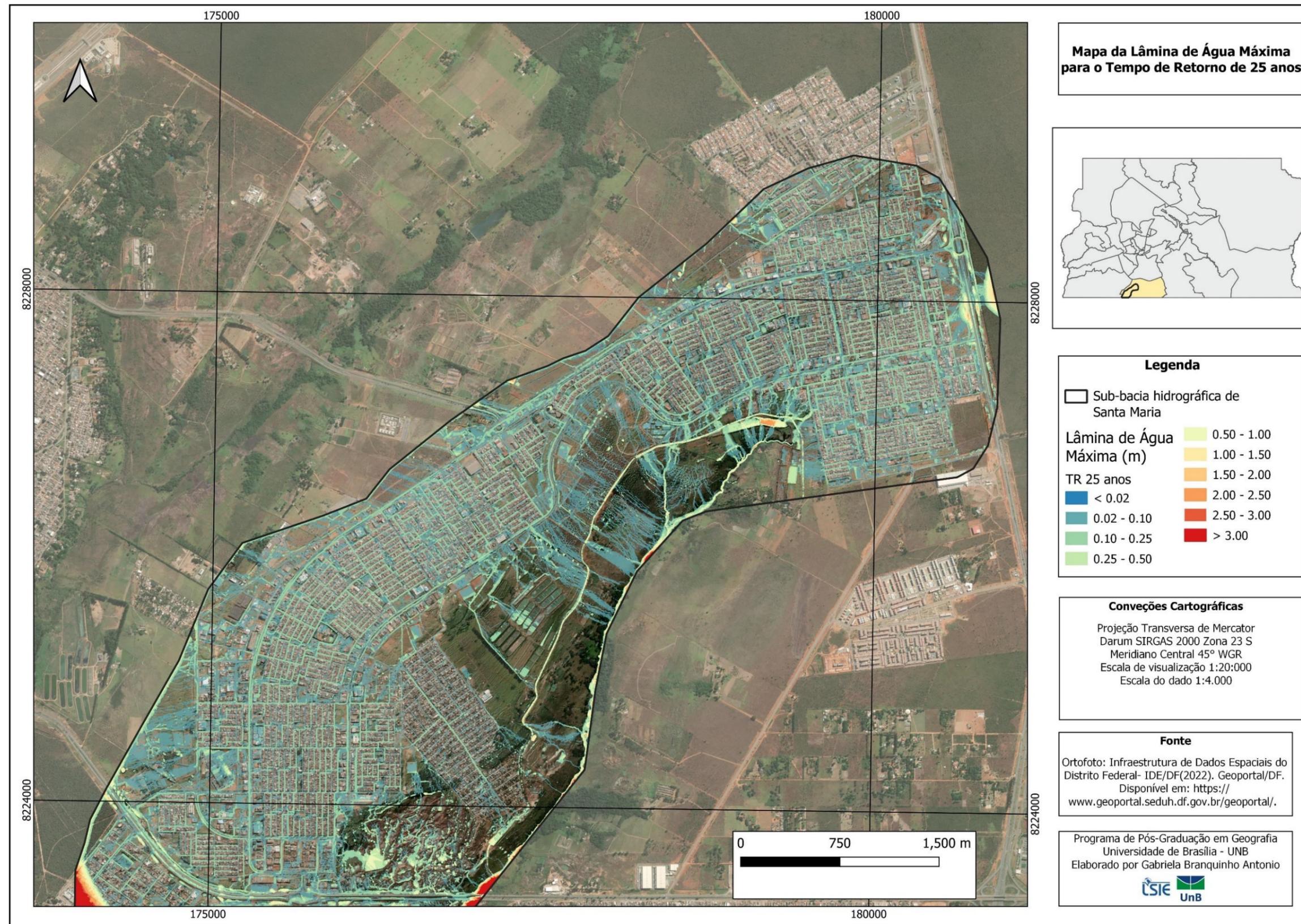


Figura 121 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

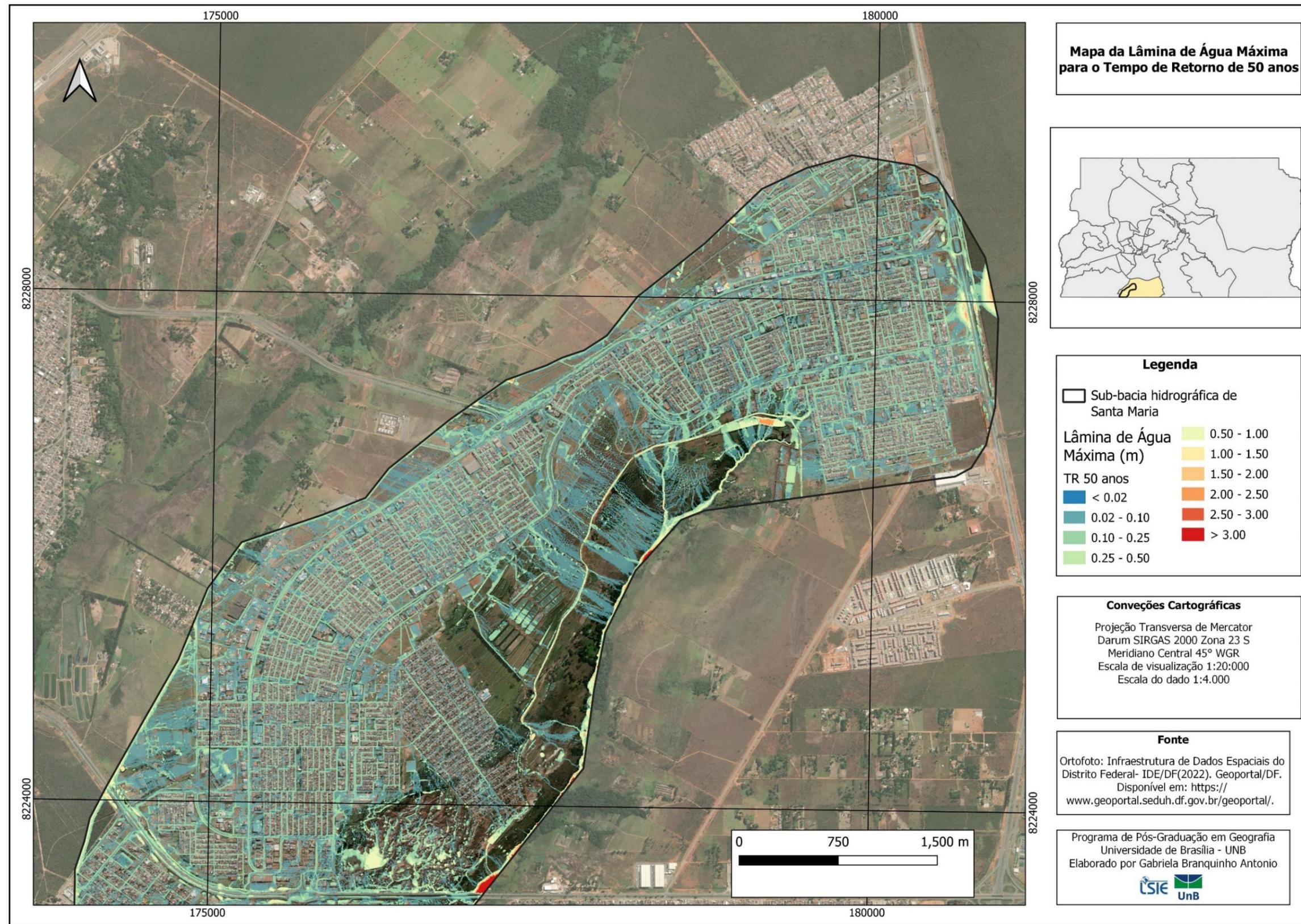


Figura 122 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

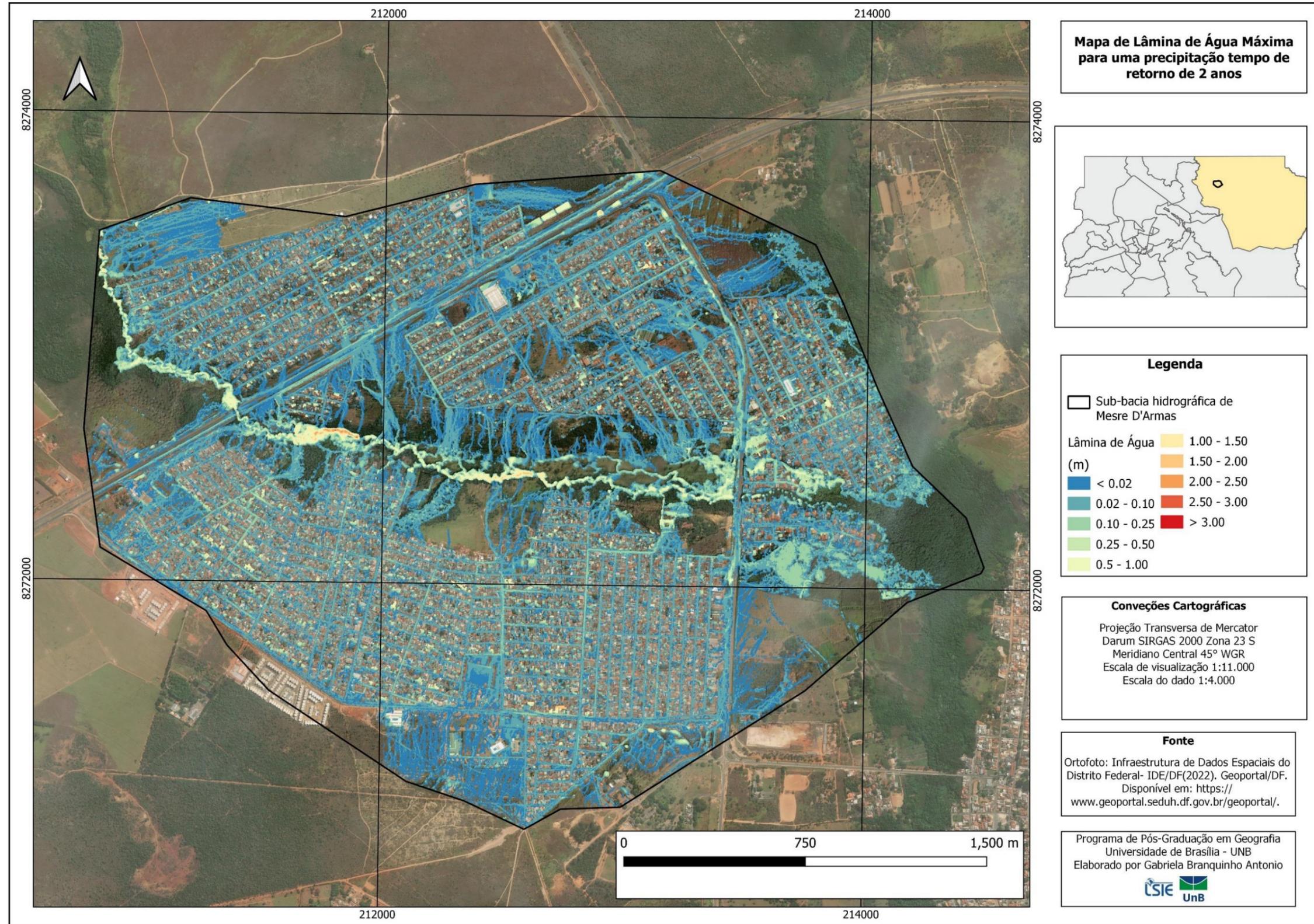


Figura 123 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

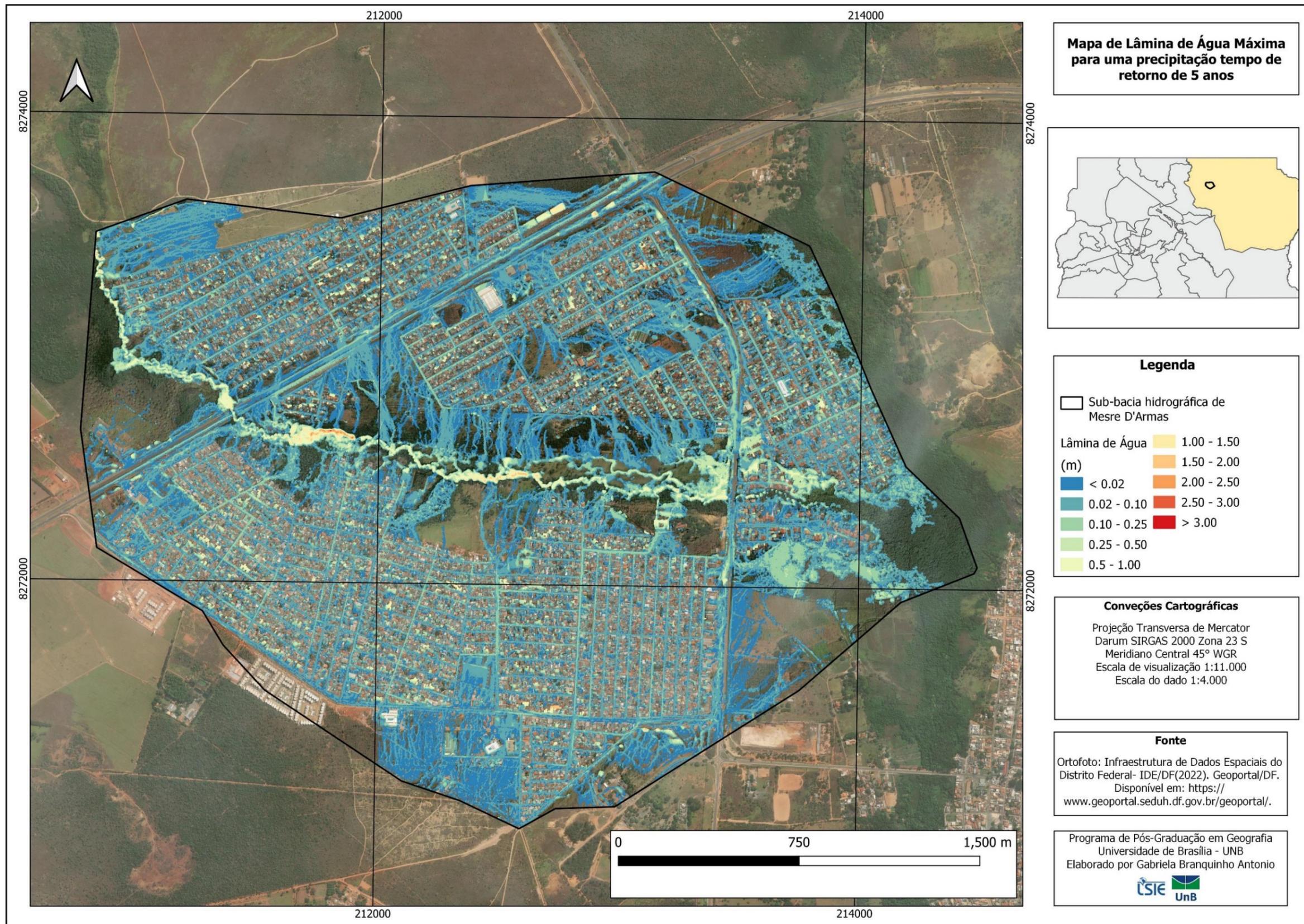


Figura 124 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

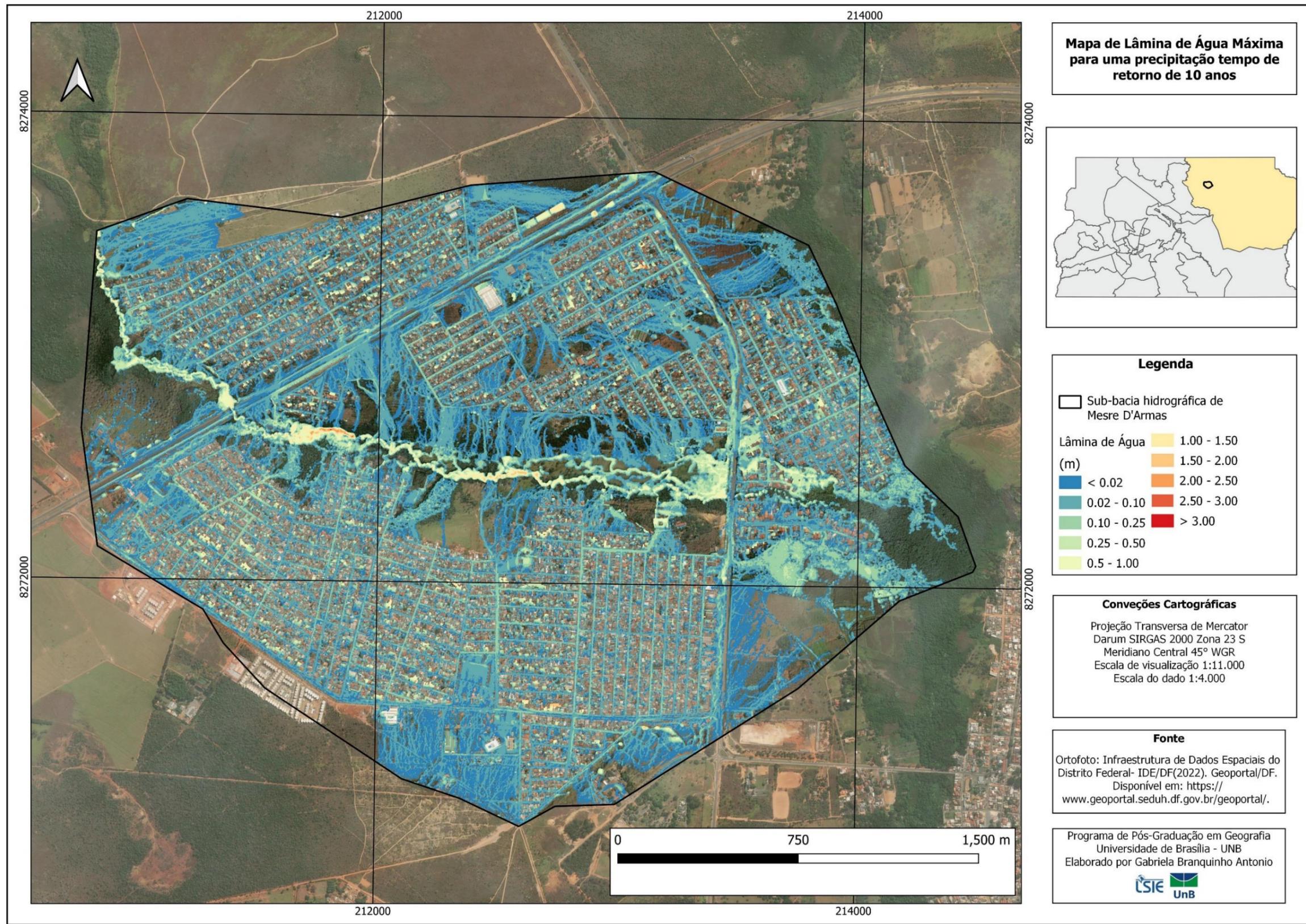


Figura 125 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

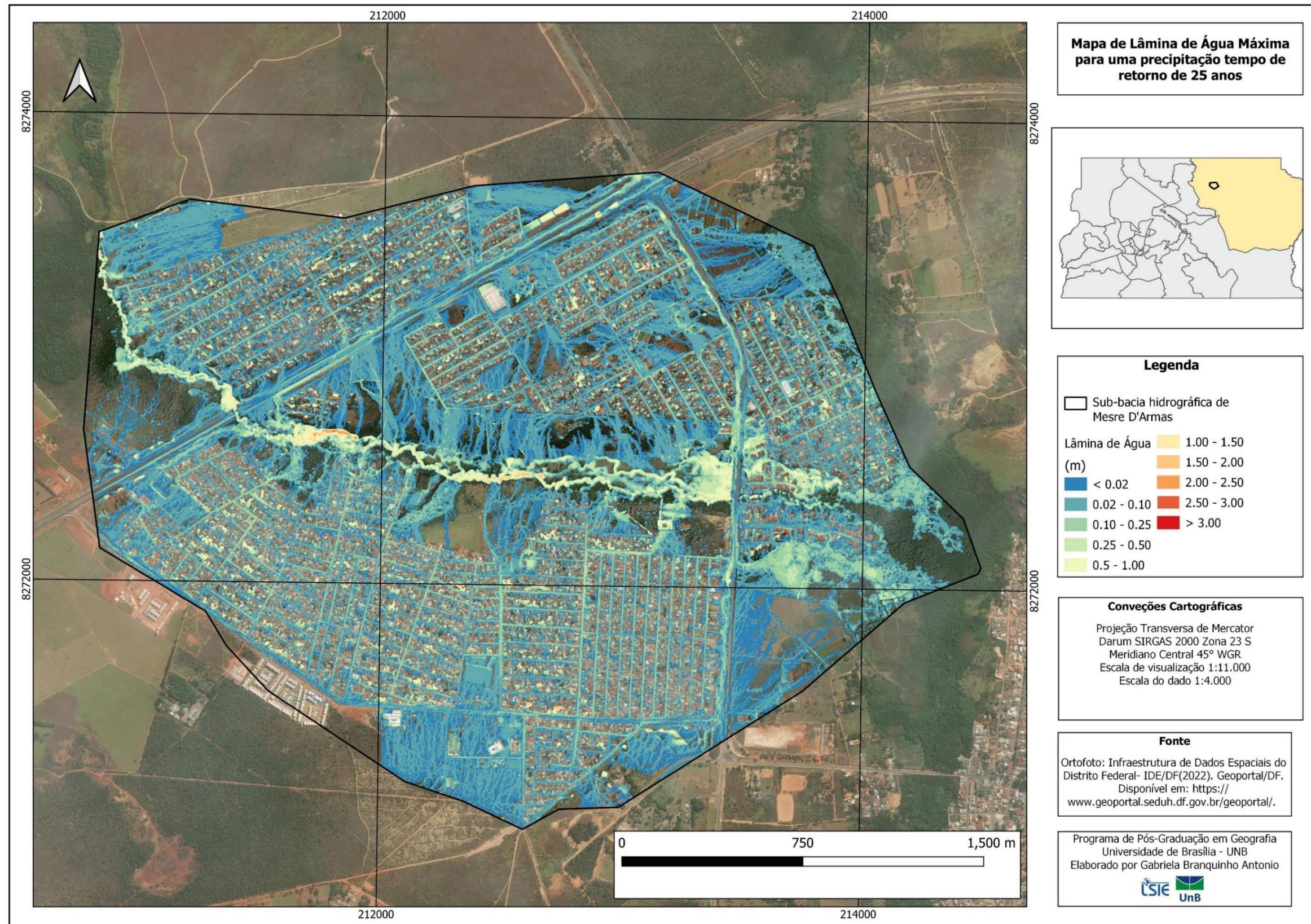


Figura 126 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

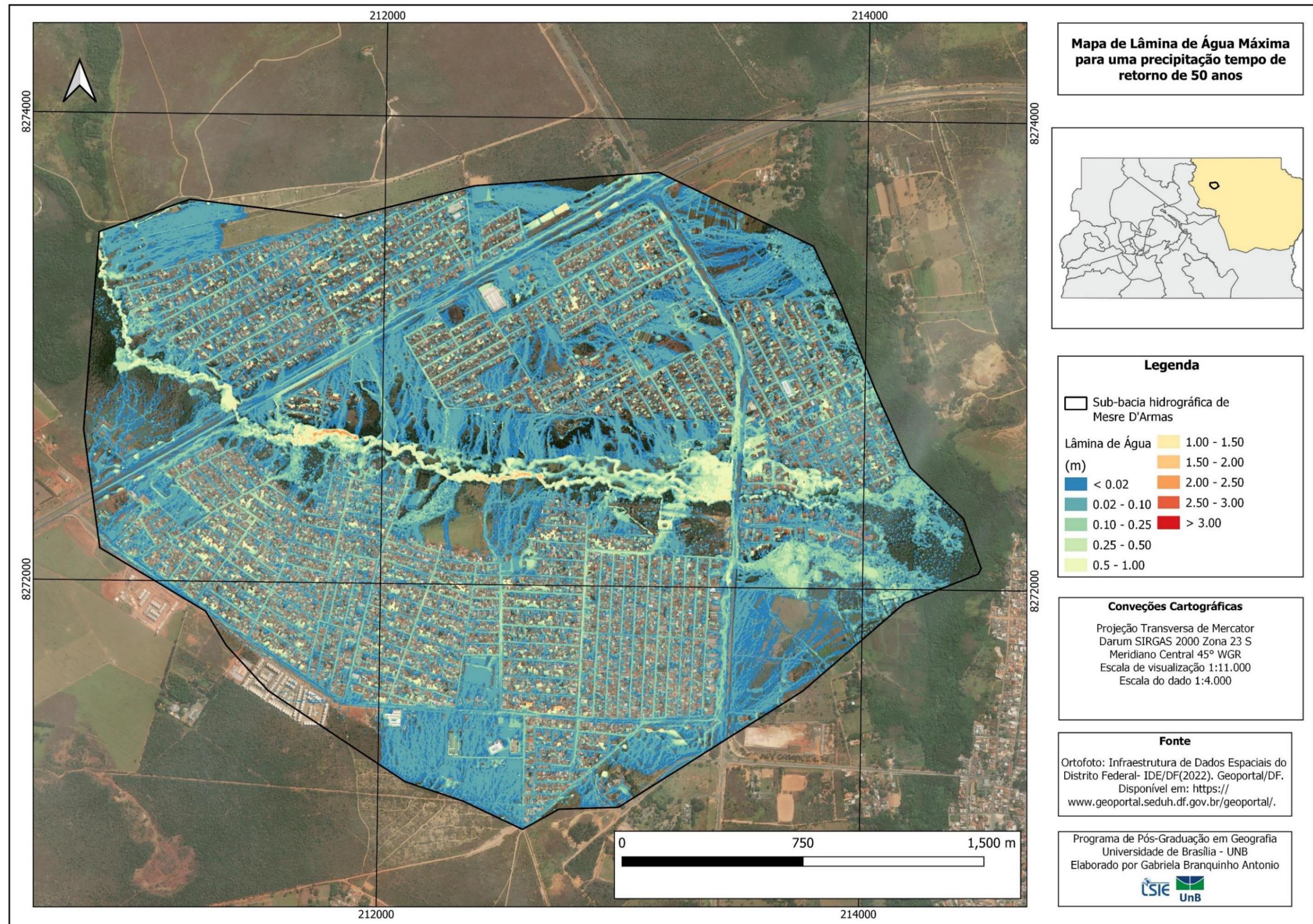


Figura 127 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

APÊNDICE E: VICENTE PIRES, ARINE VICENTE PIRES – LÂMINA DE ÁGUA MÁXIMA (M)

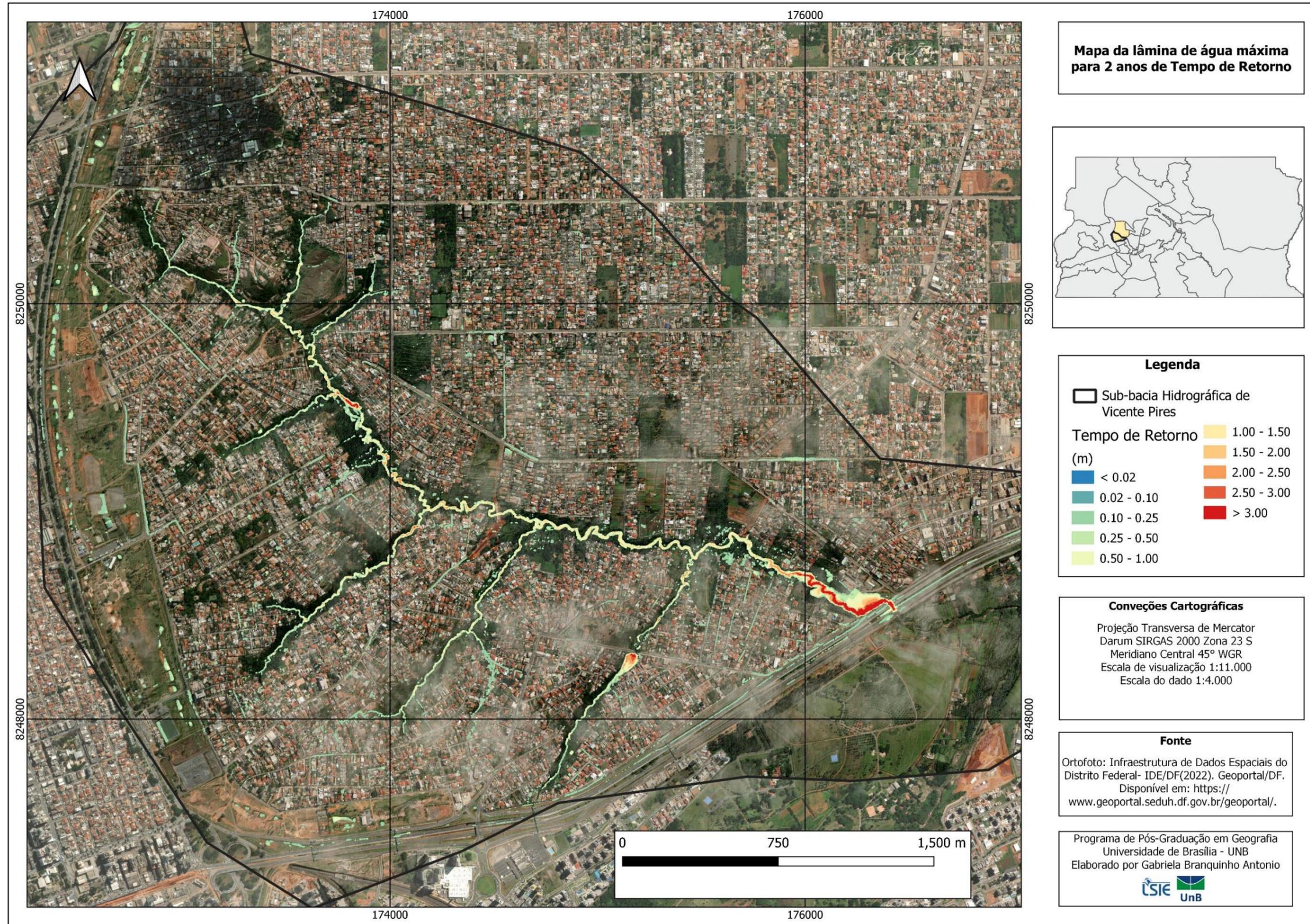


Figura 128 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

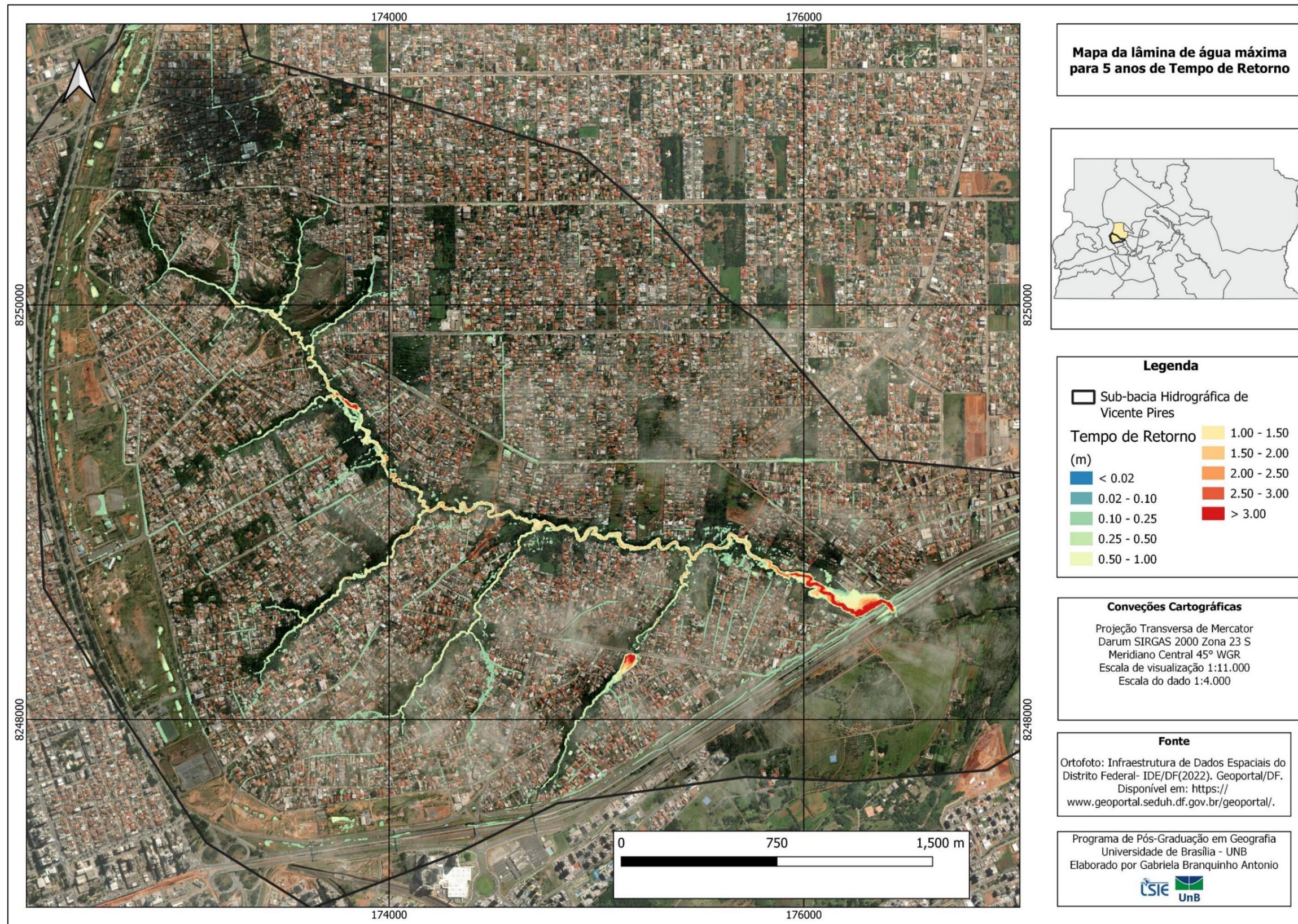


Figura 129 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

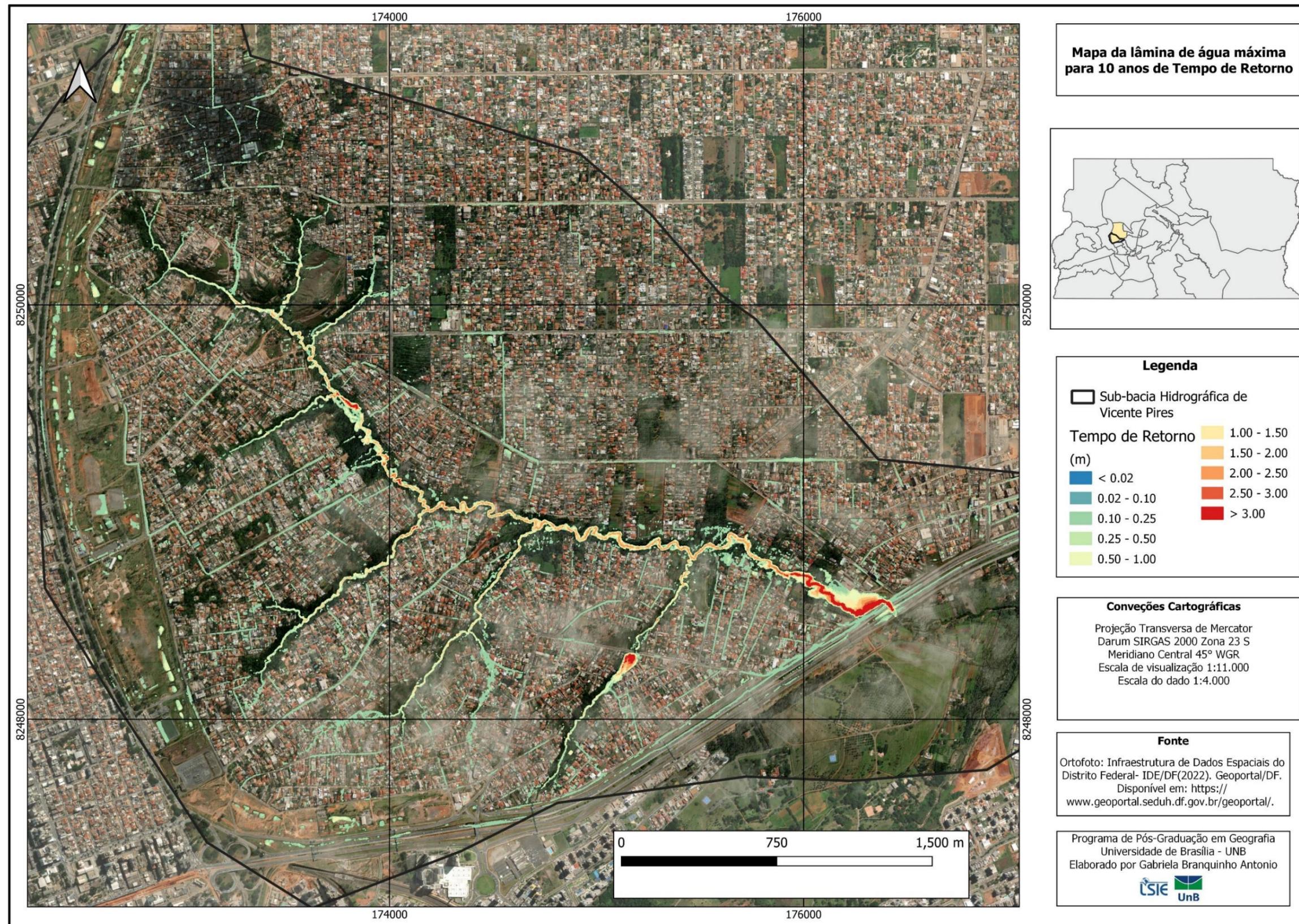


Figura 130 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

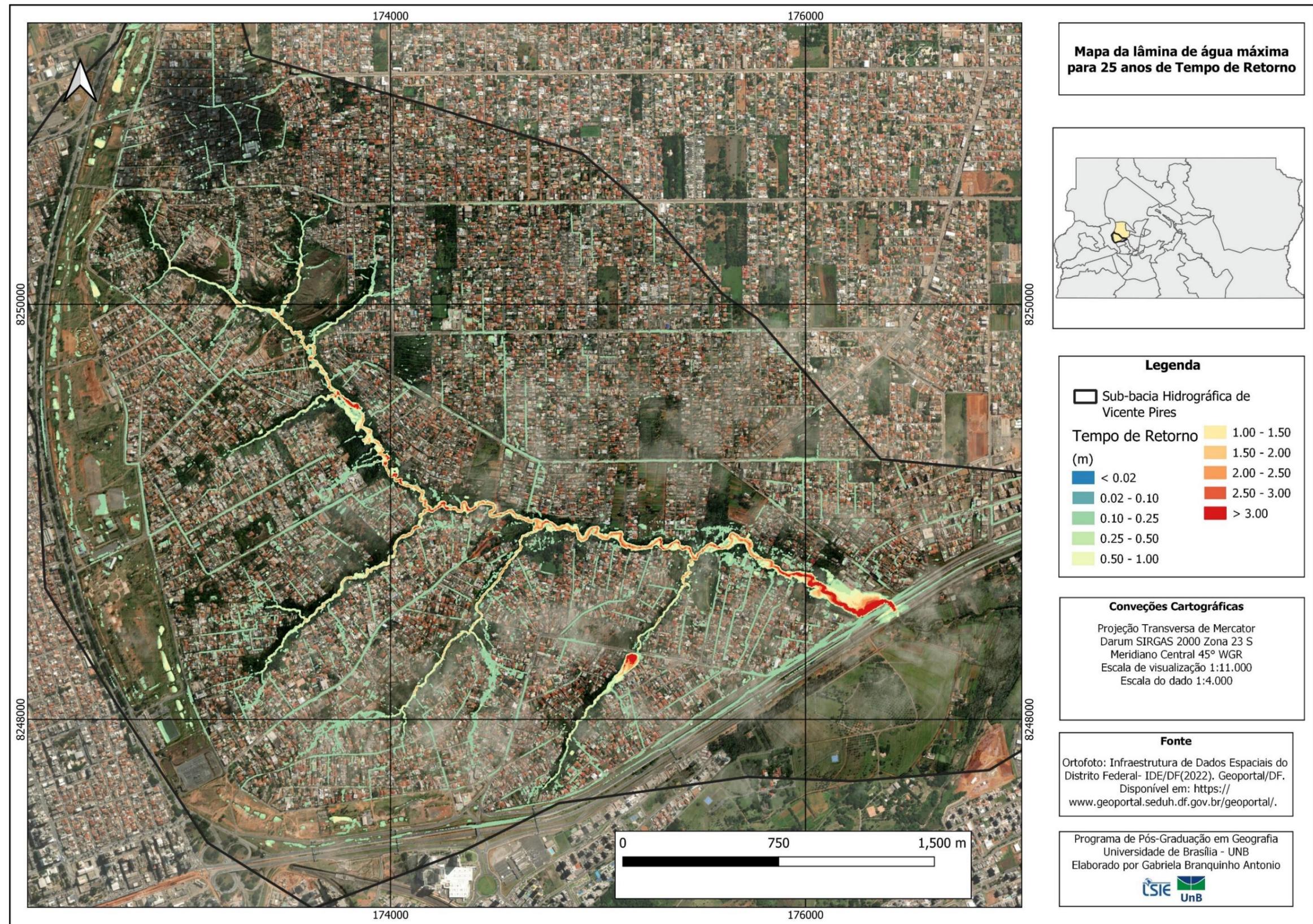


Figura 131 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

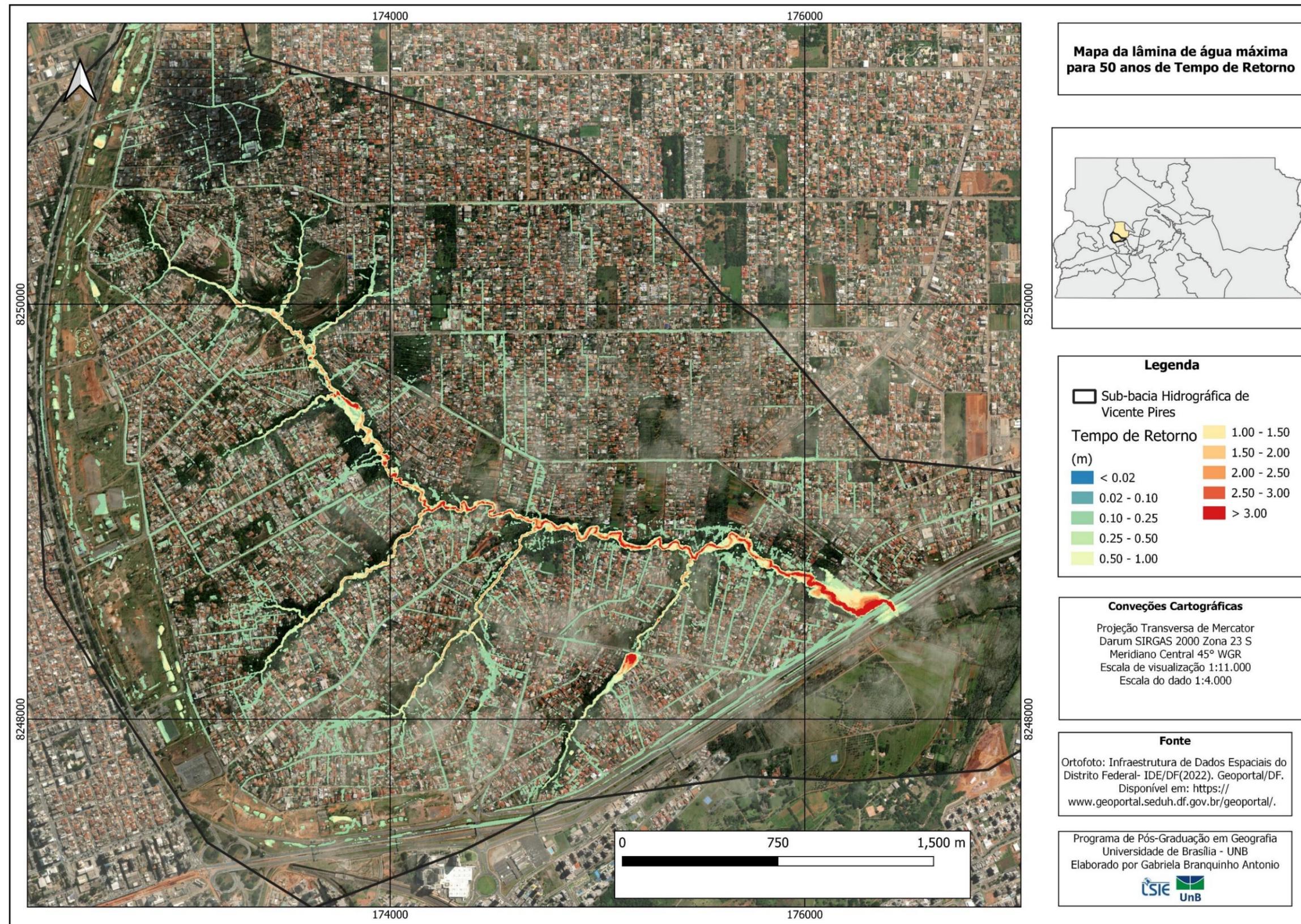


Figura 132 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

APÊNDICE F: NÚCLEO BANDEIRANTE, ARIS VILA CAUHY – LÂMINA DE ÁGUA LIMA (M)

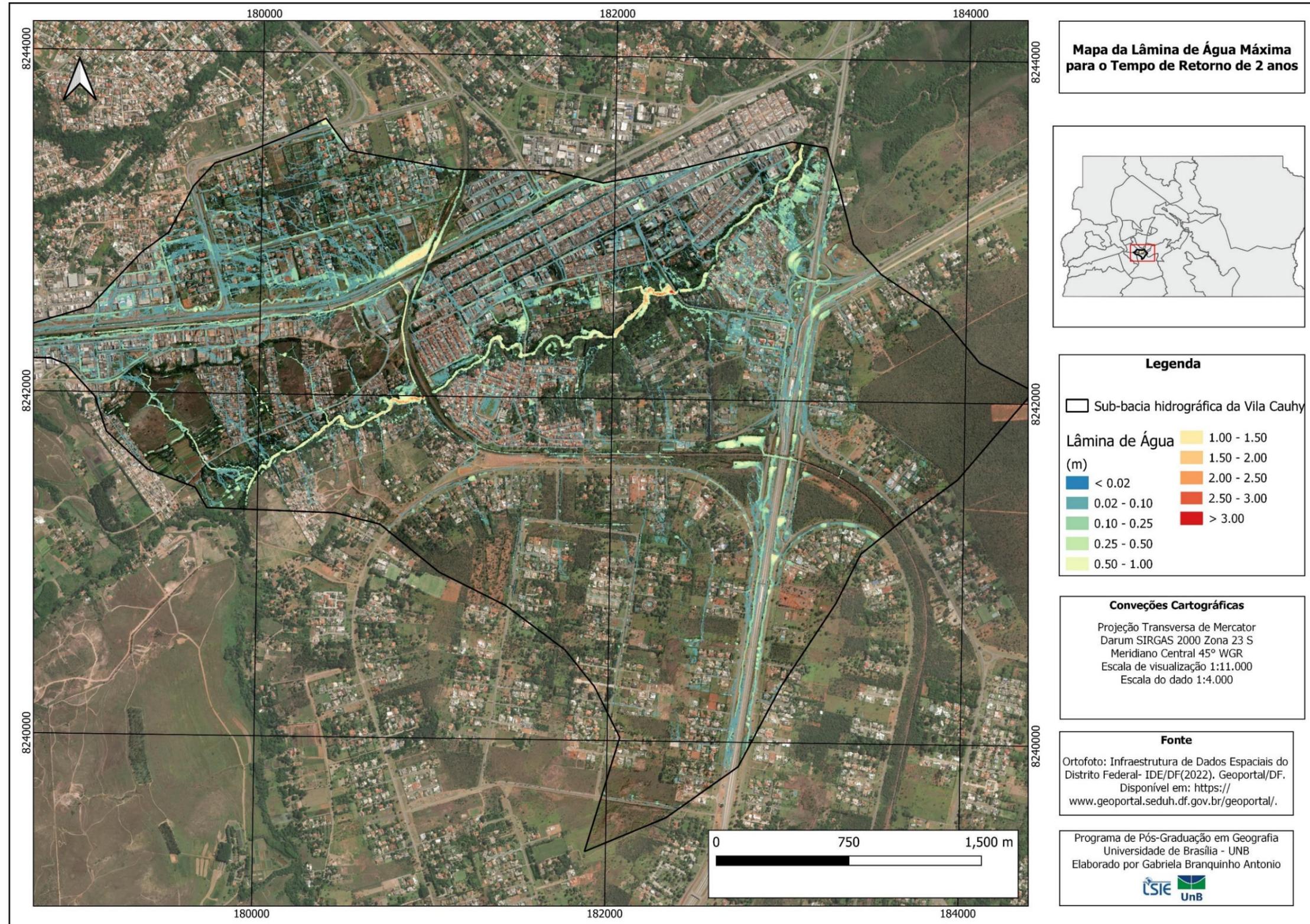


Figura 133 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

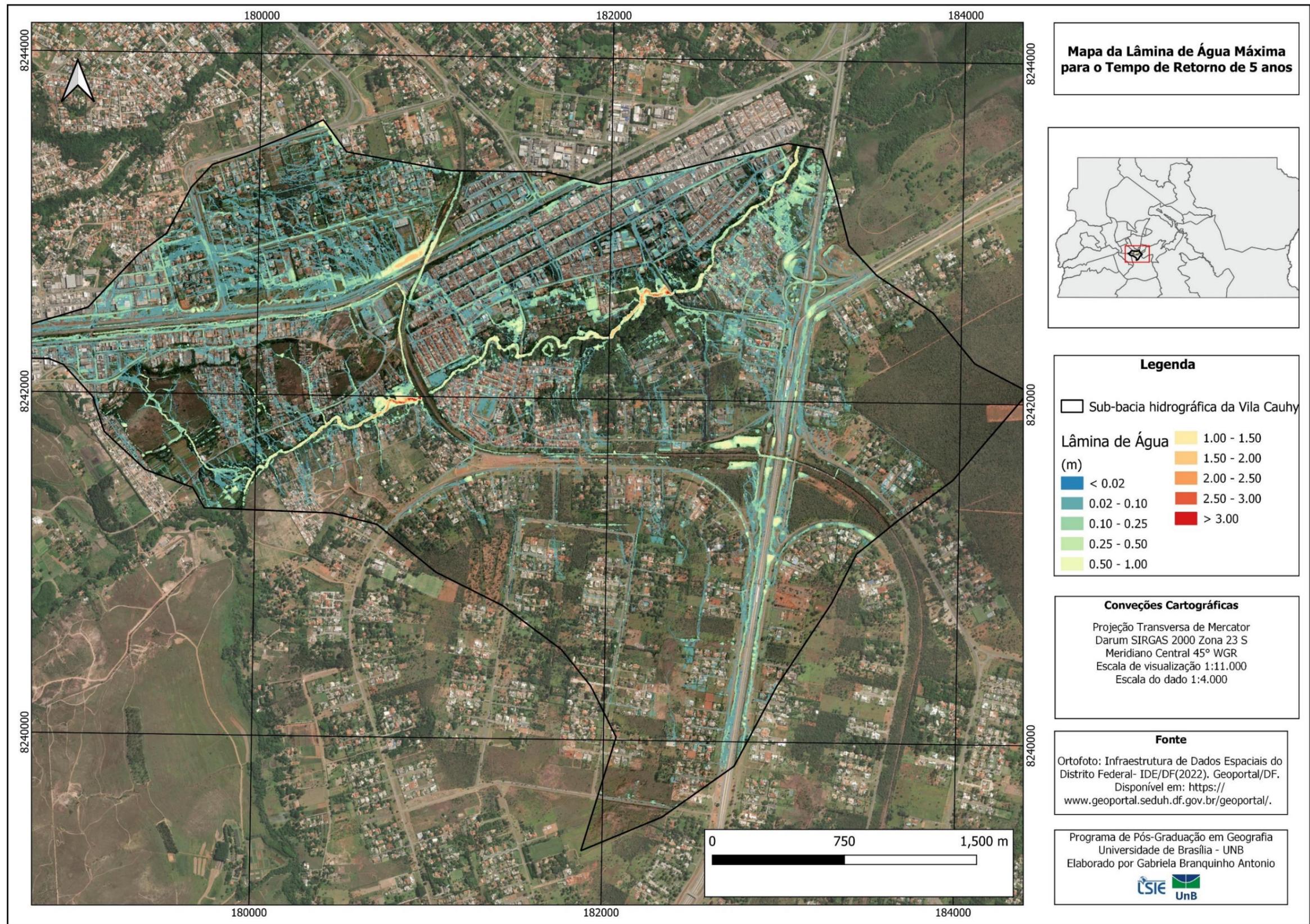


Figura 134 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

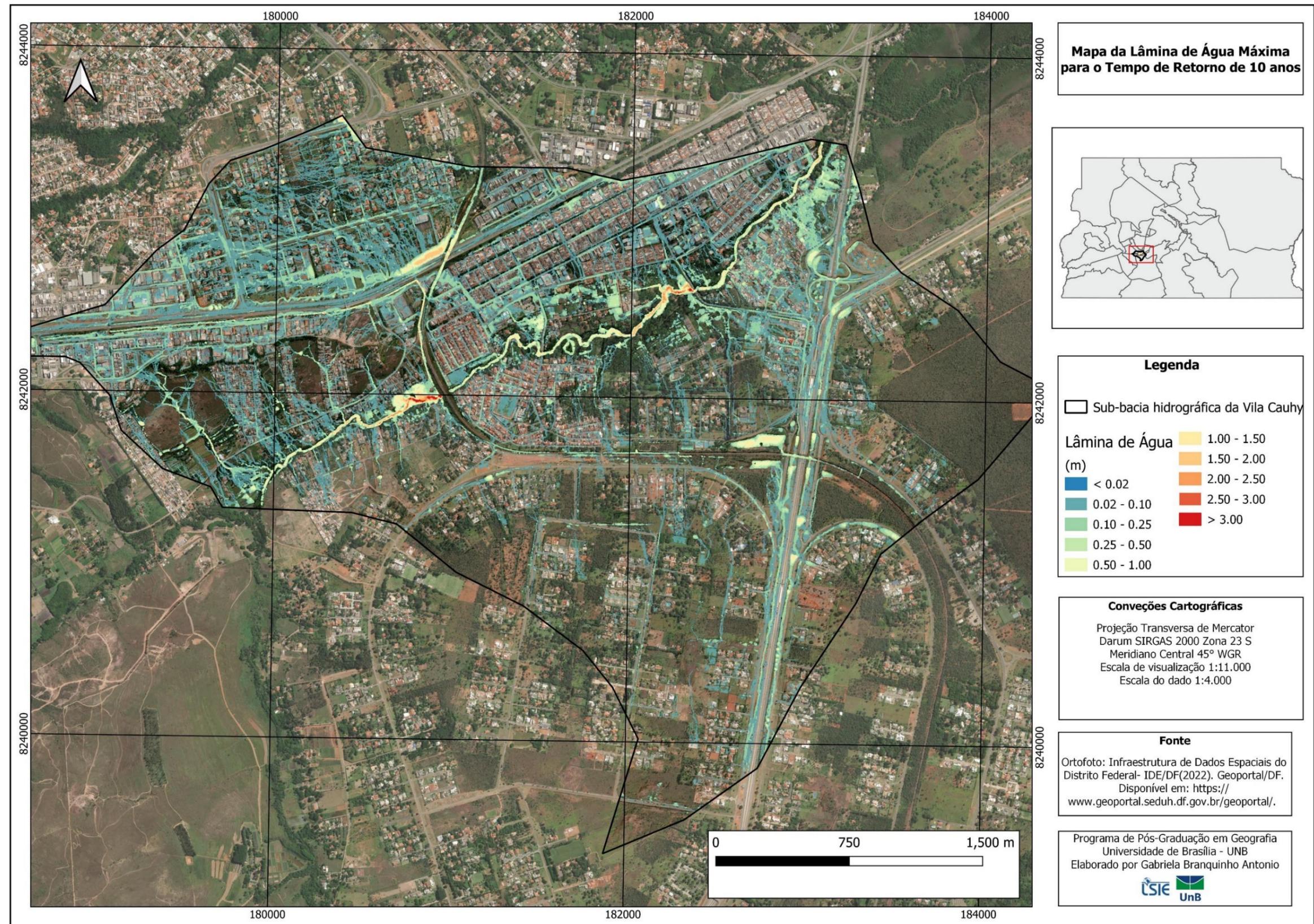


Figura 135 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

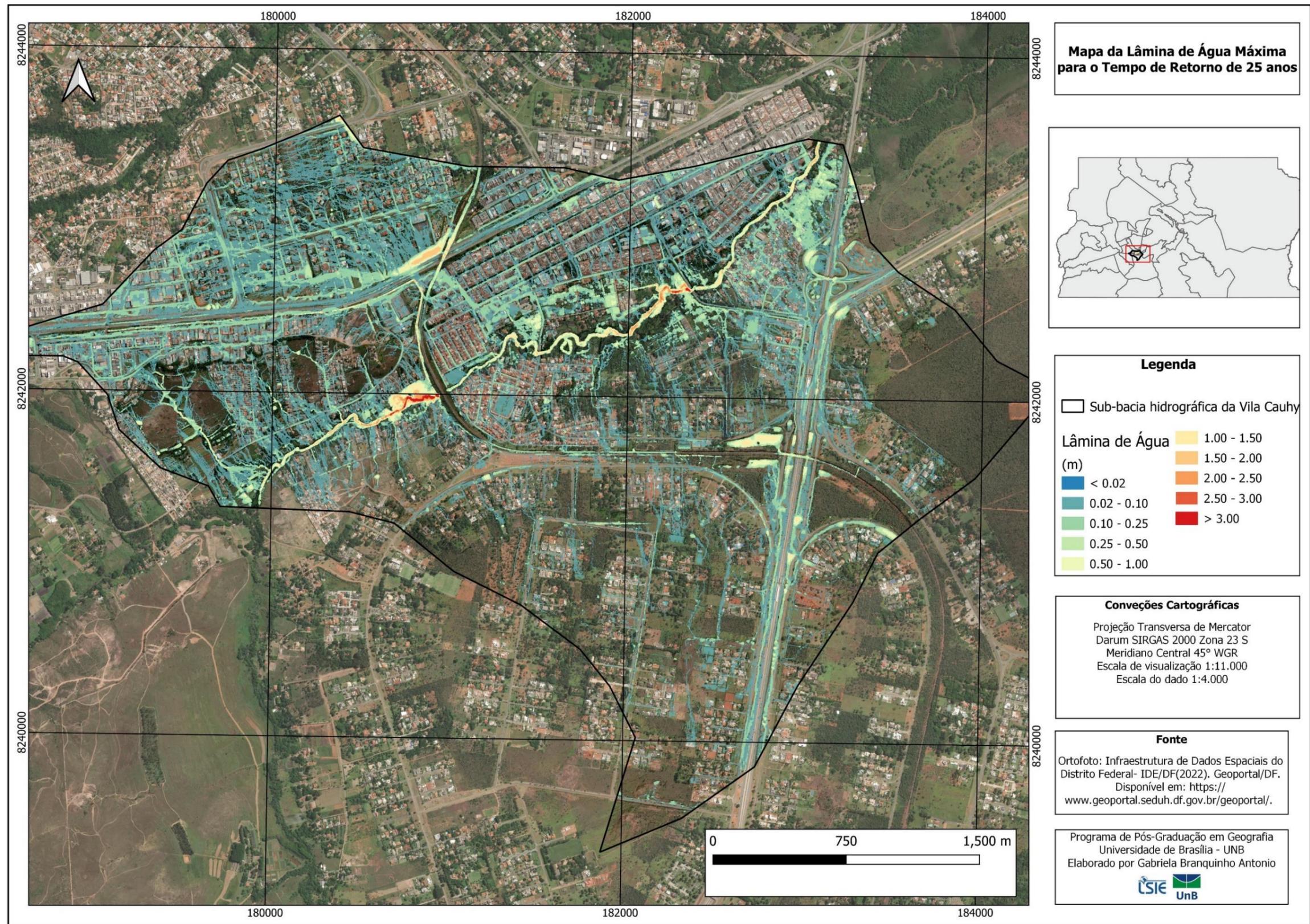


Figura 136 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

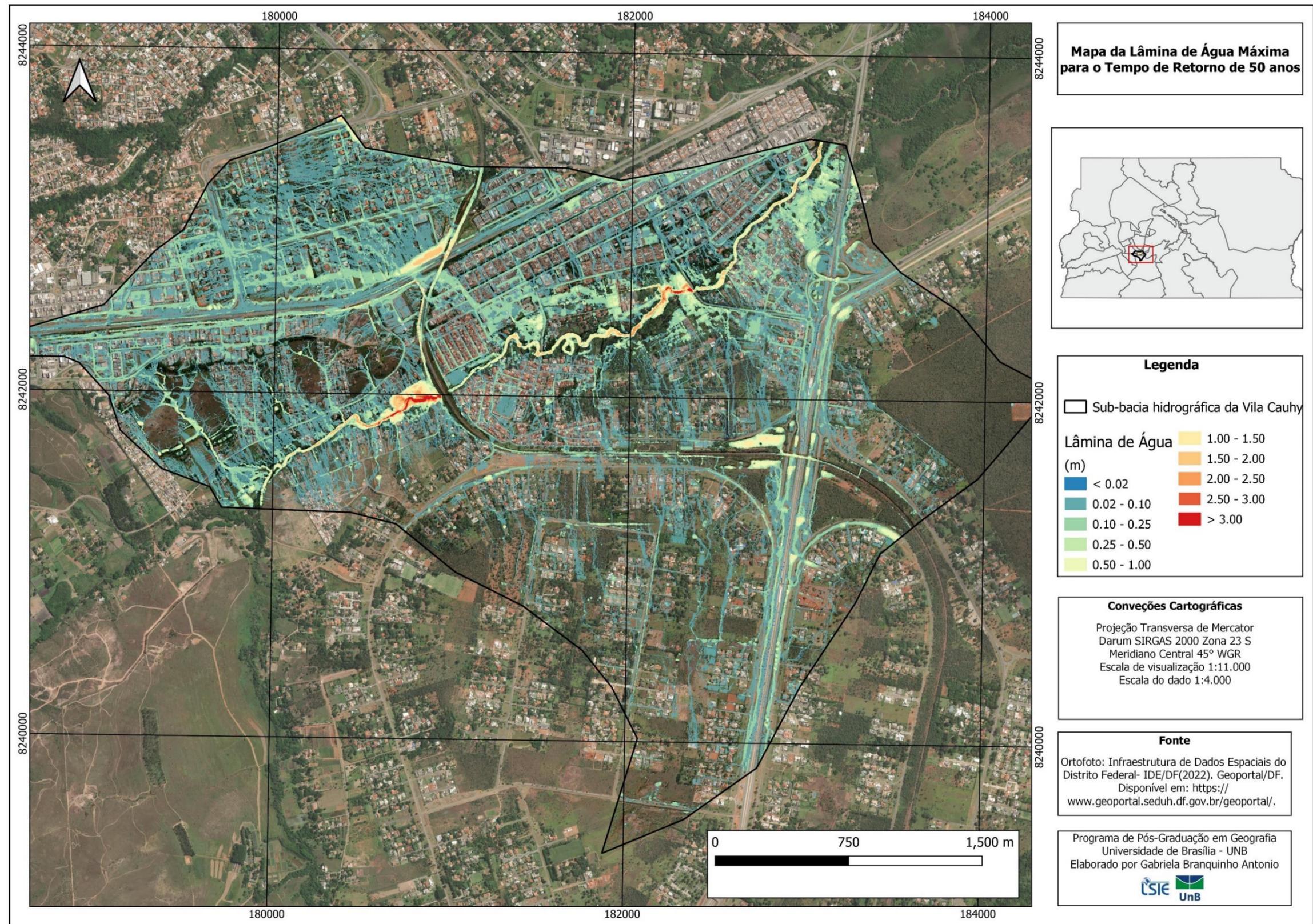


Figura 137 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

APÊNDICE G: PÔR DO SOL/SOL NASCENTE E CEILÂNDIA – LÂMINA DE ÁGUA MÁXIMA (M)

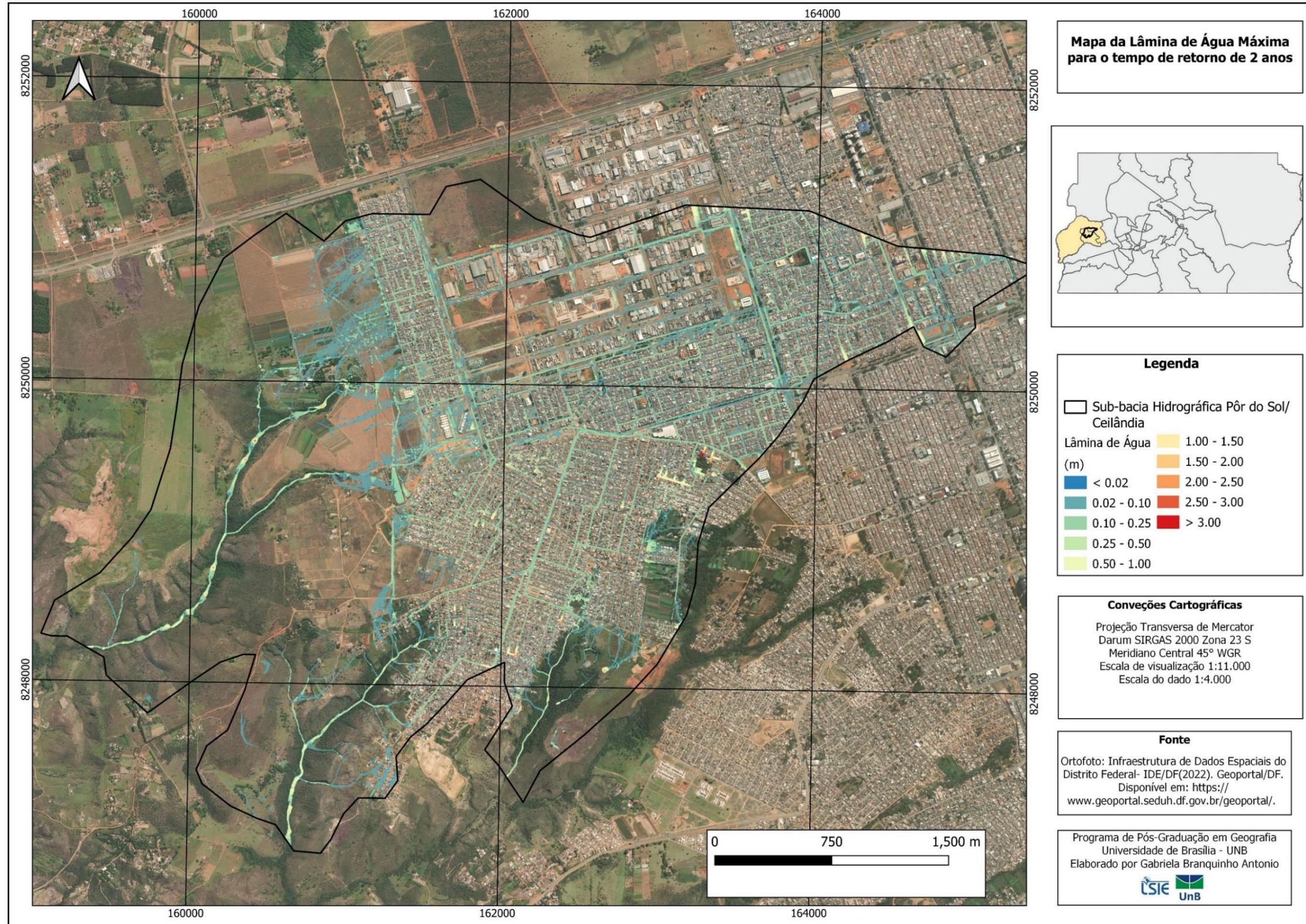


Figura 138 – Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

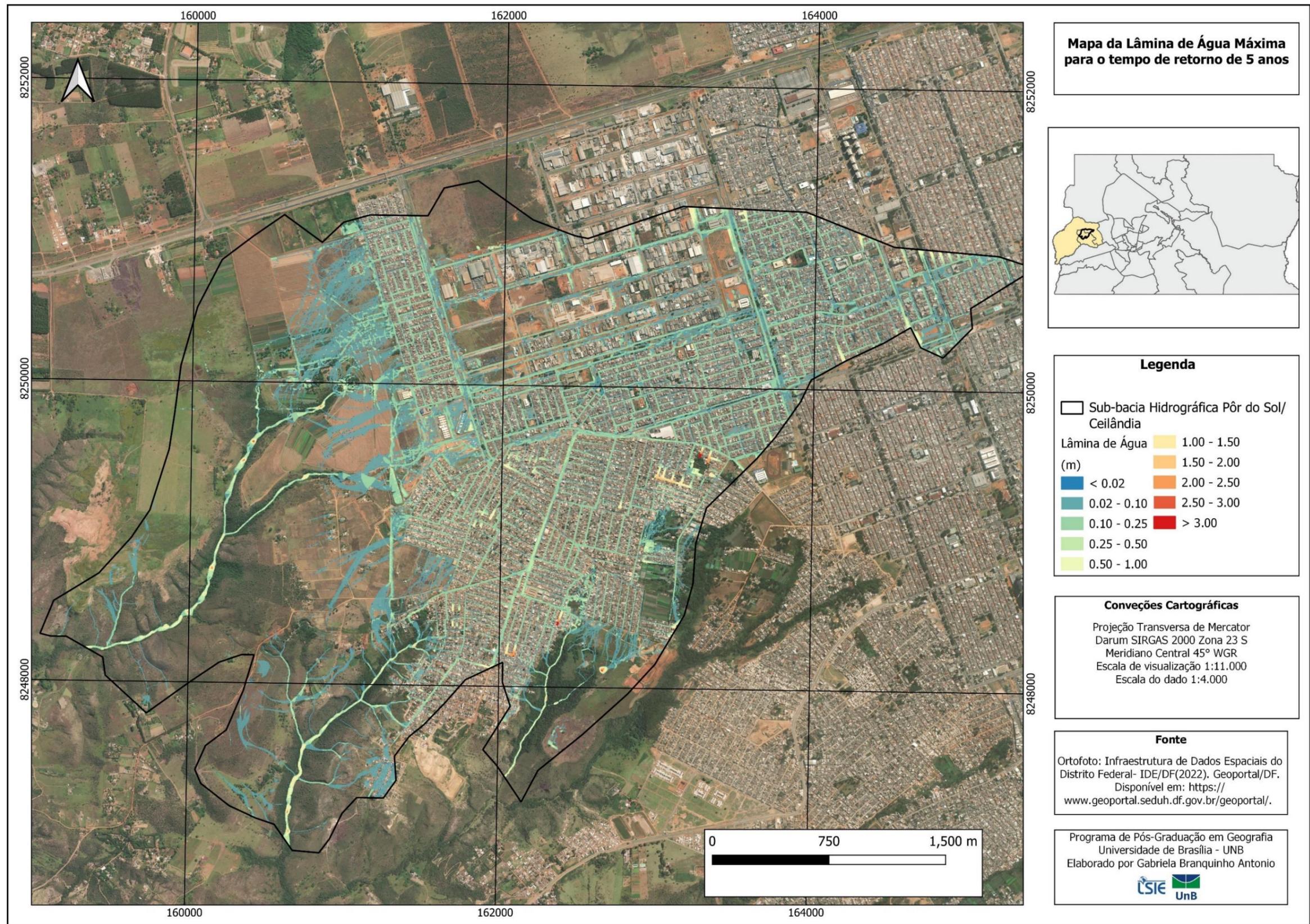


Figura 139 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

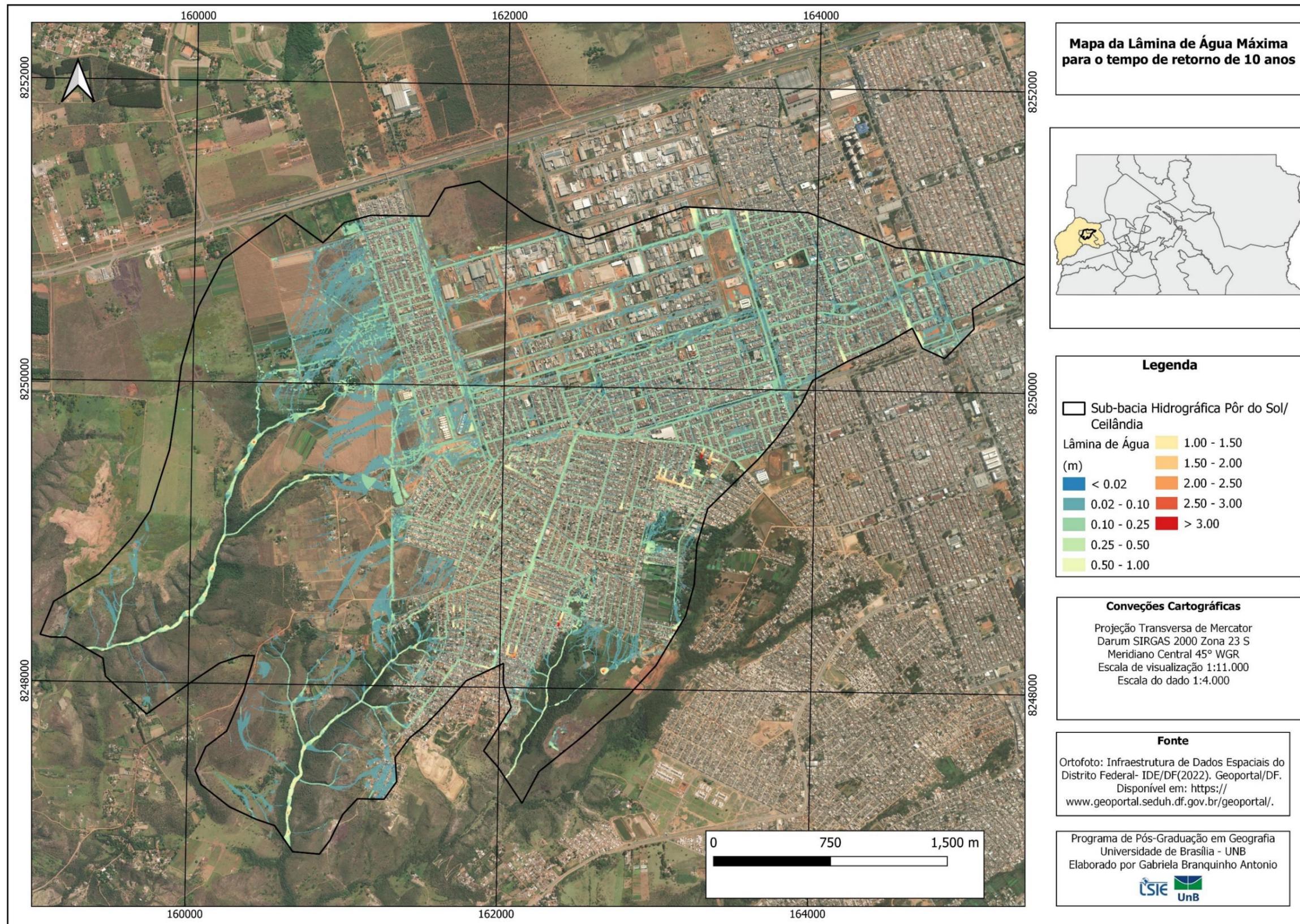


Figura 140 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

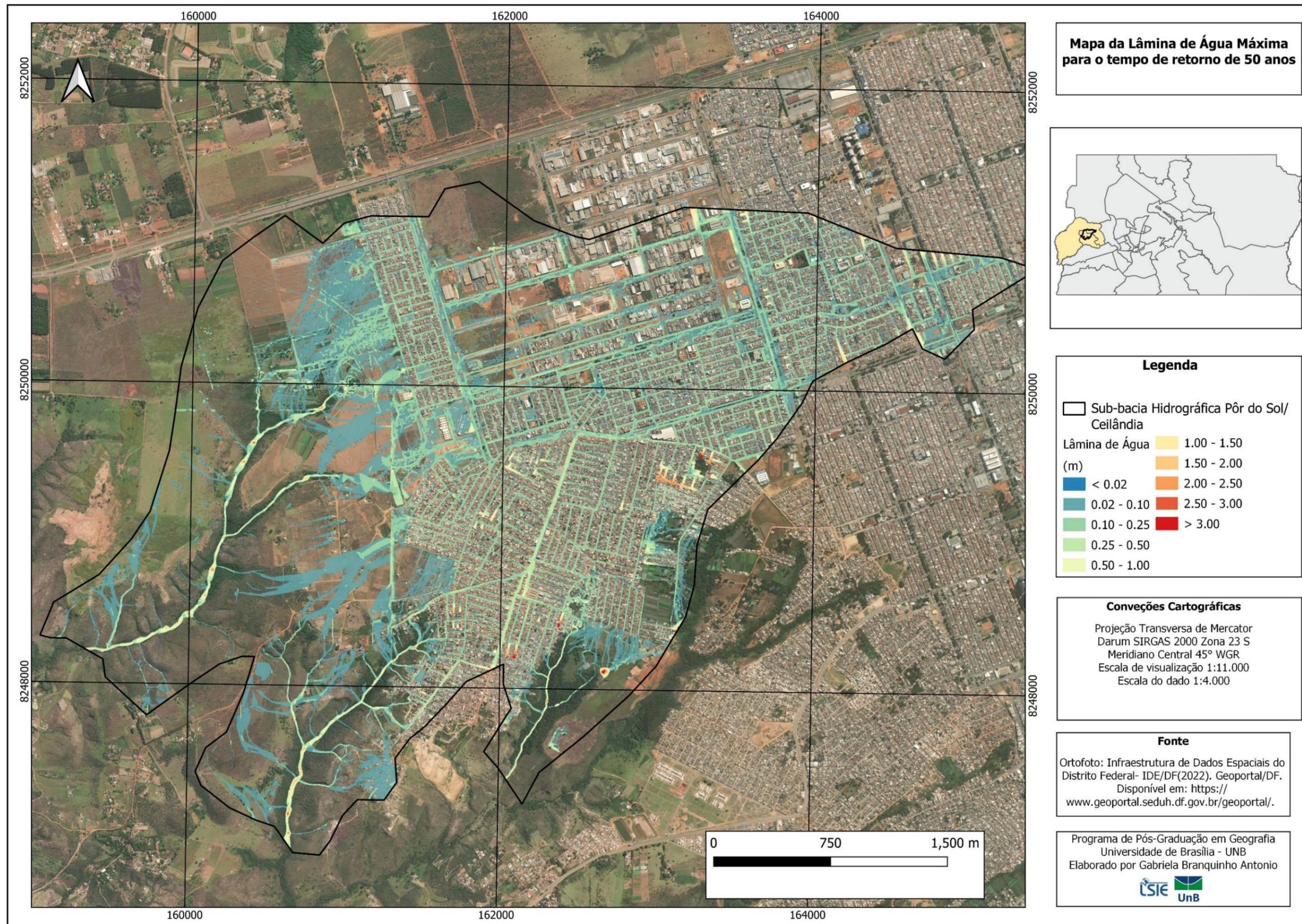


Figura 141 - Mapa da lâmina de água máxima (metros) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

APÊNDICE H: ASA NORTE, PLANO PILOTO, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)

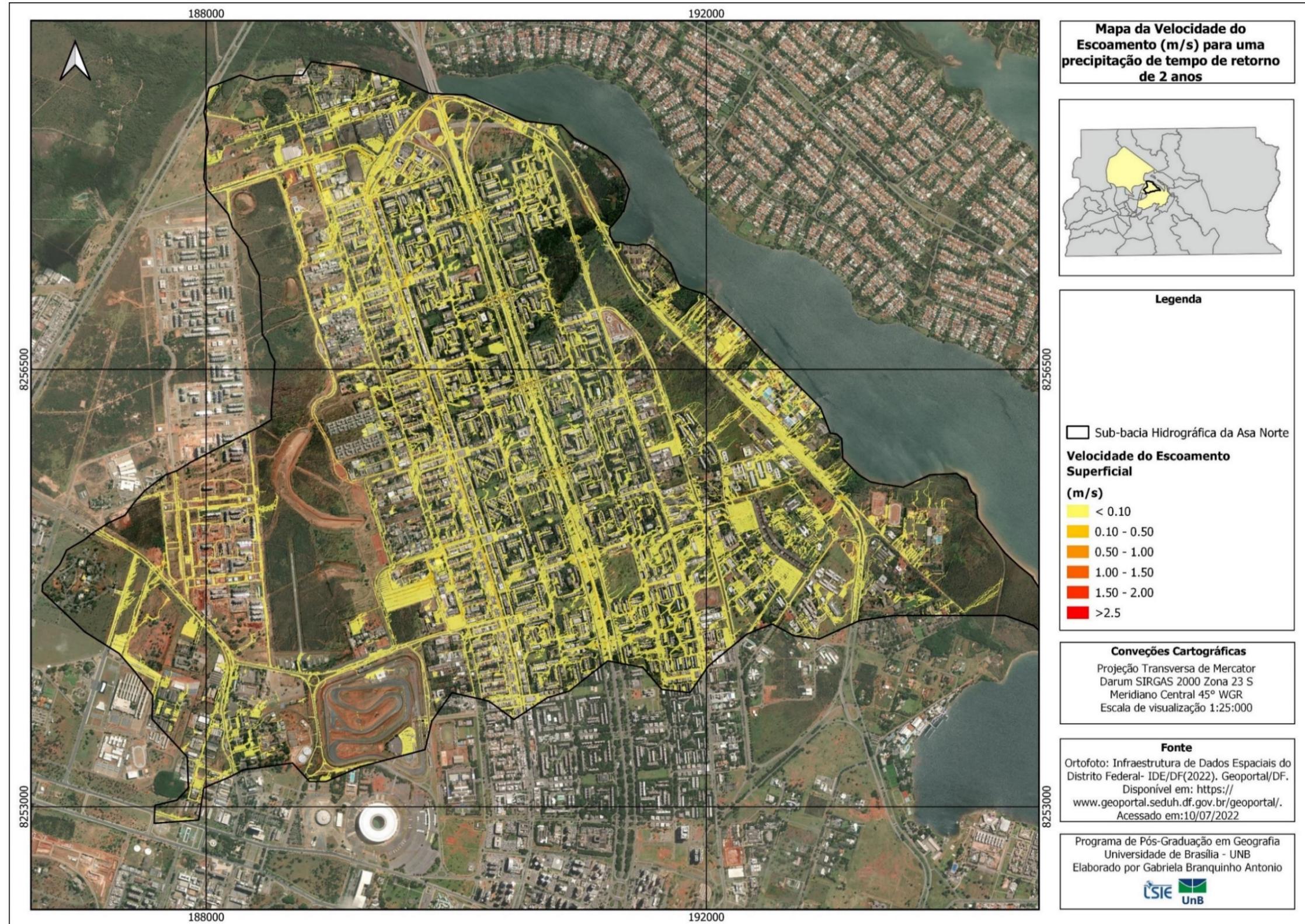


Figura 142 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

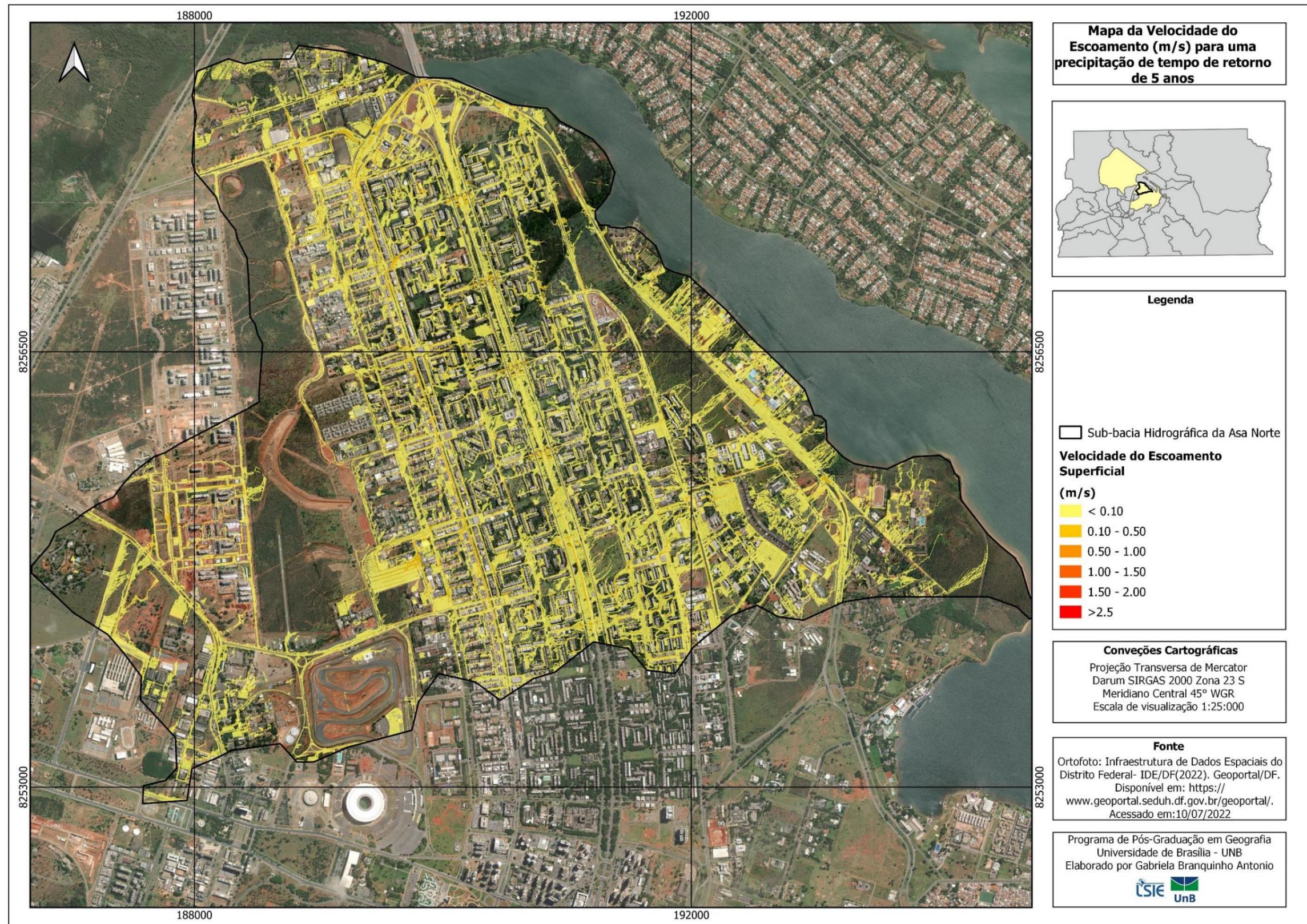


Figura 143 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

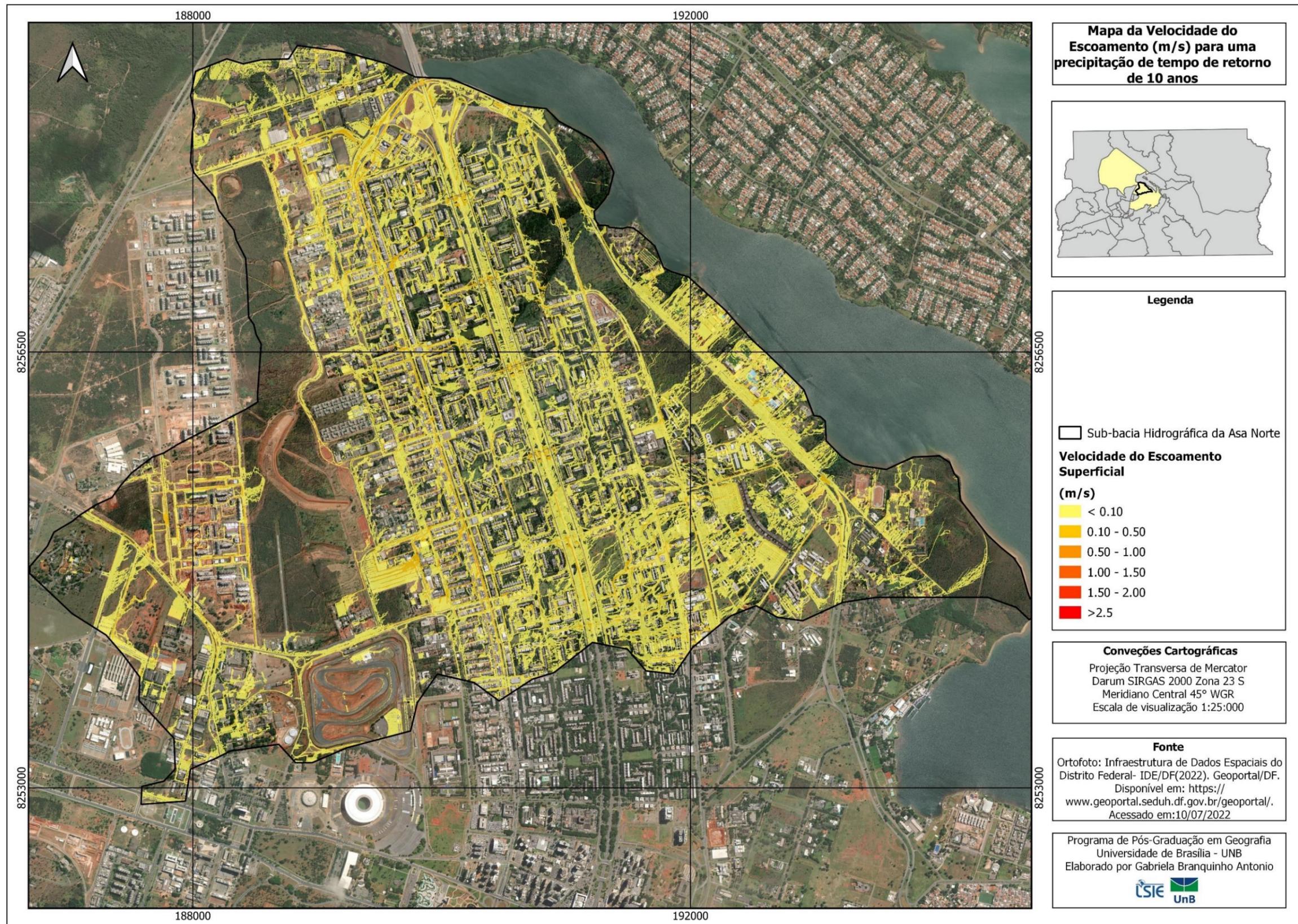


Figura 144 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

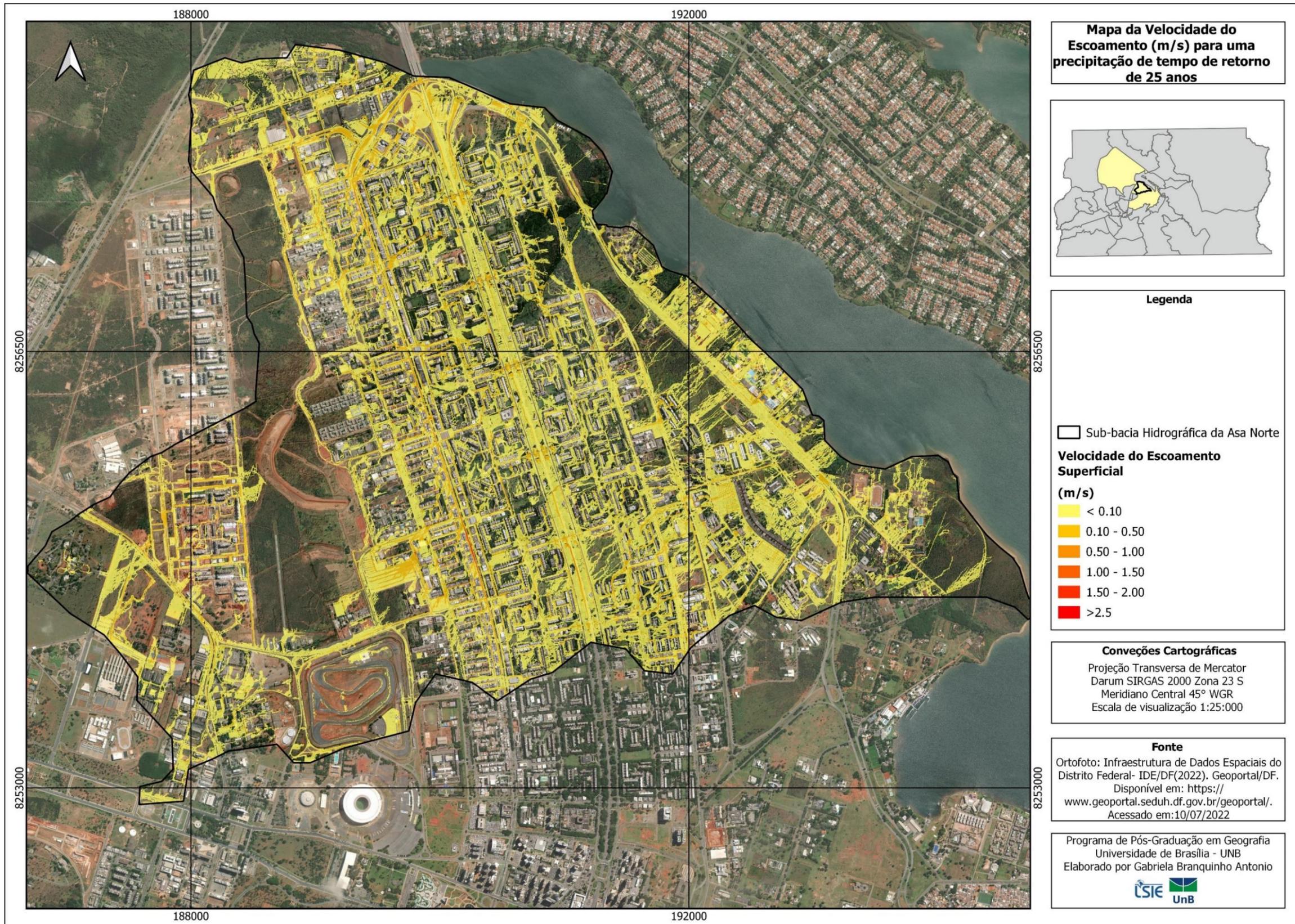


Figura 145 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

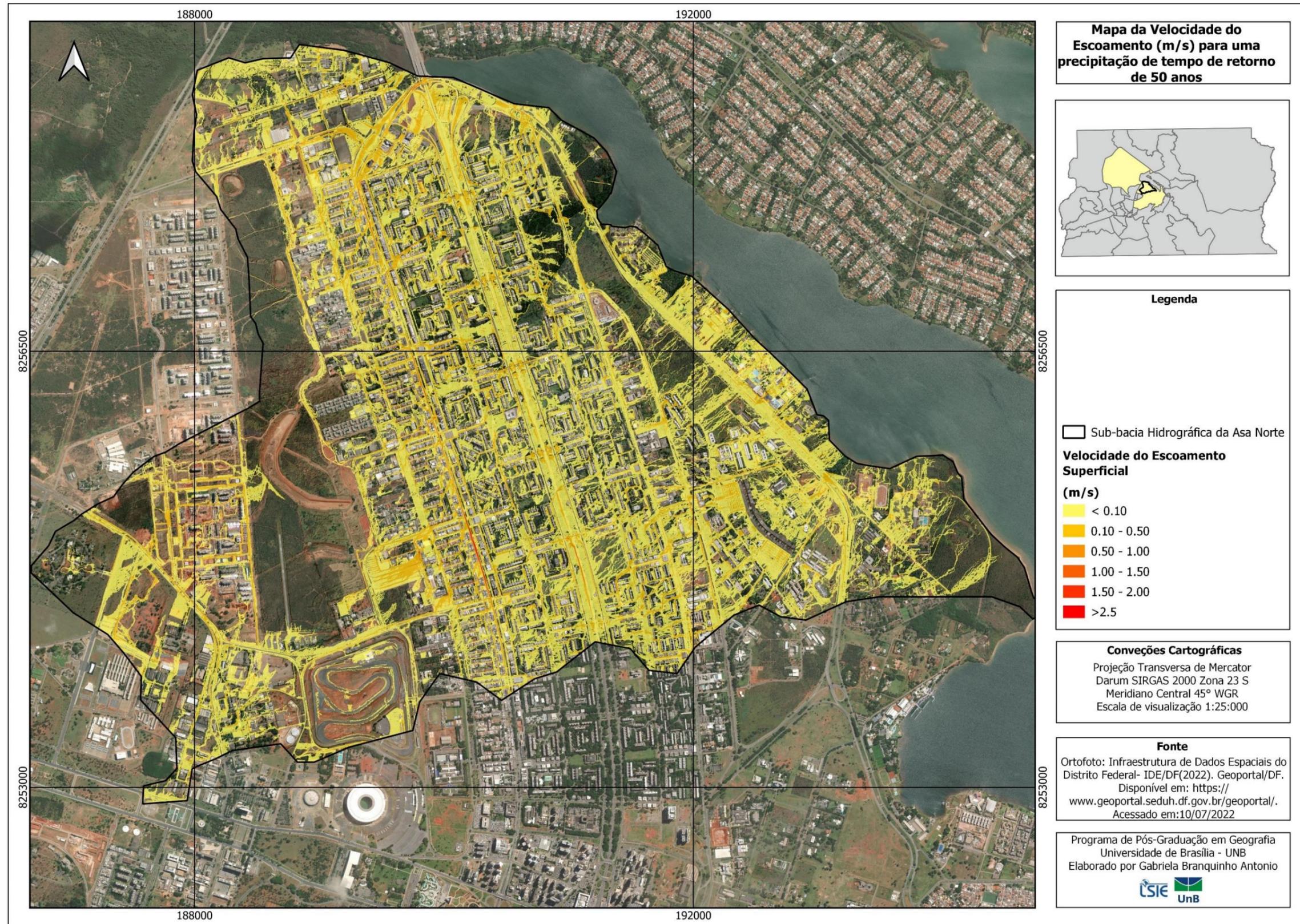


Figura 146 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Asa Norte/Plano Piloto – DF.

APÊNDICE I: SANTA MARIA, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)

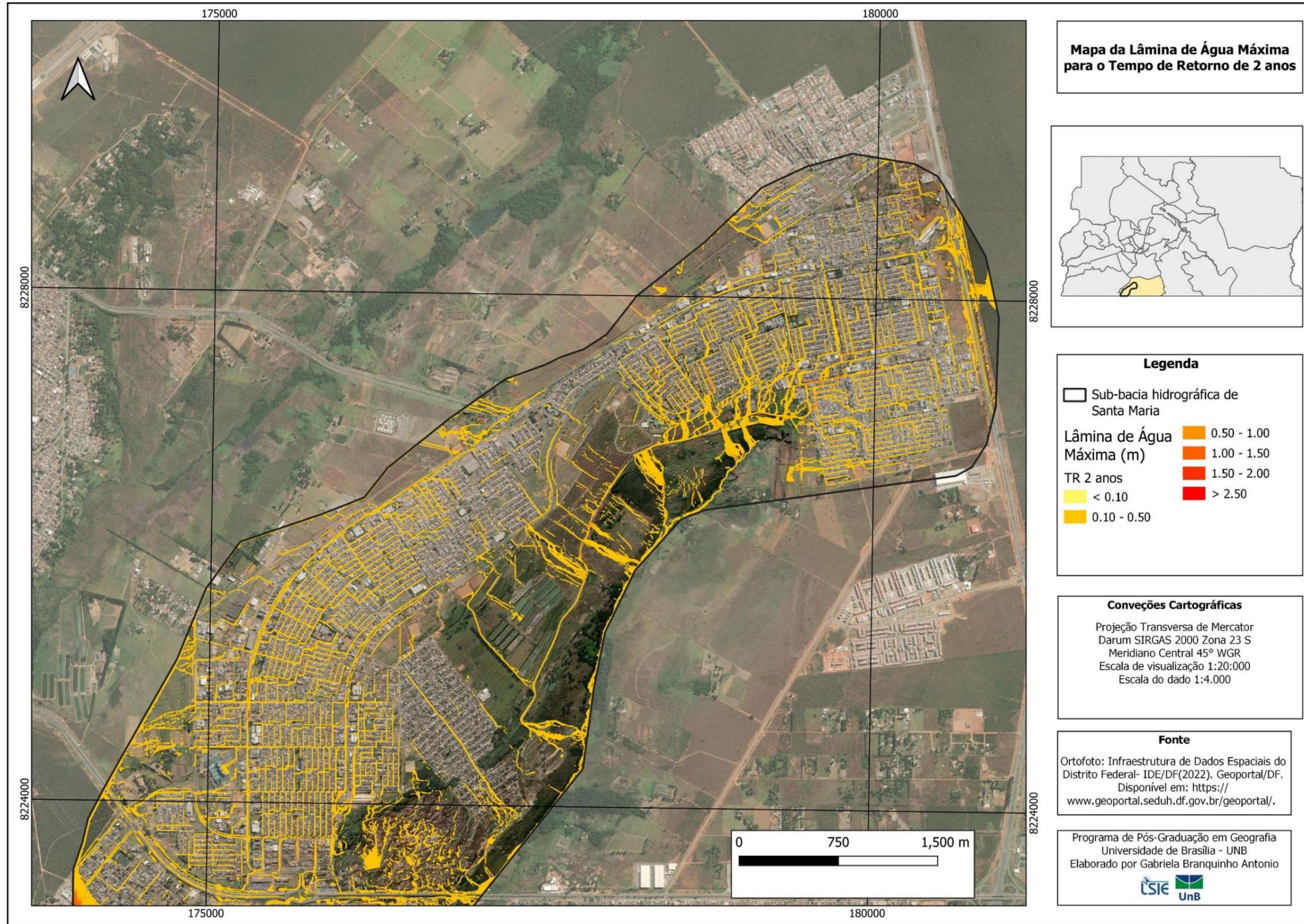


Figura 147 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

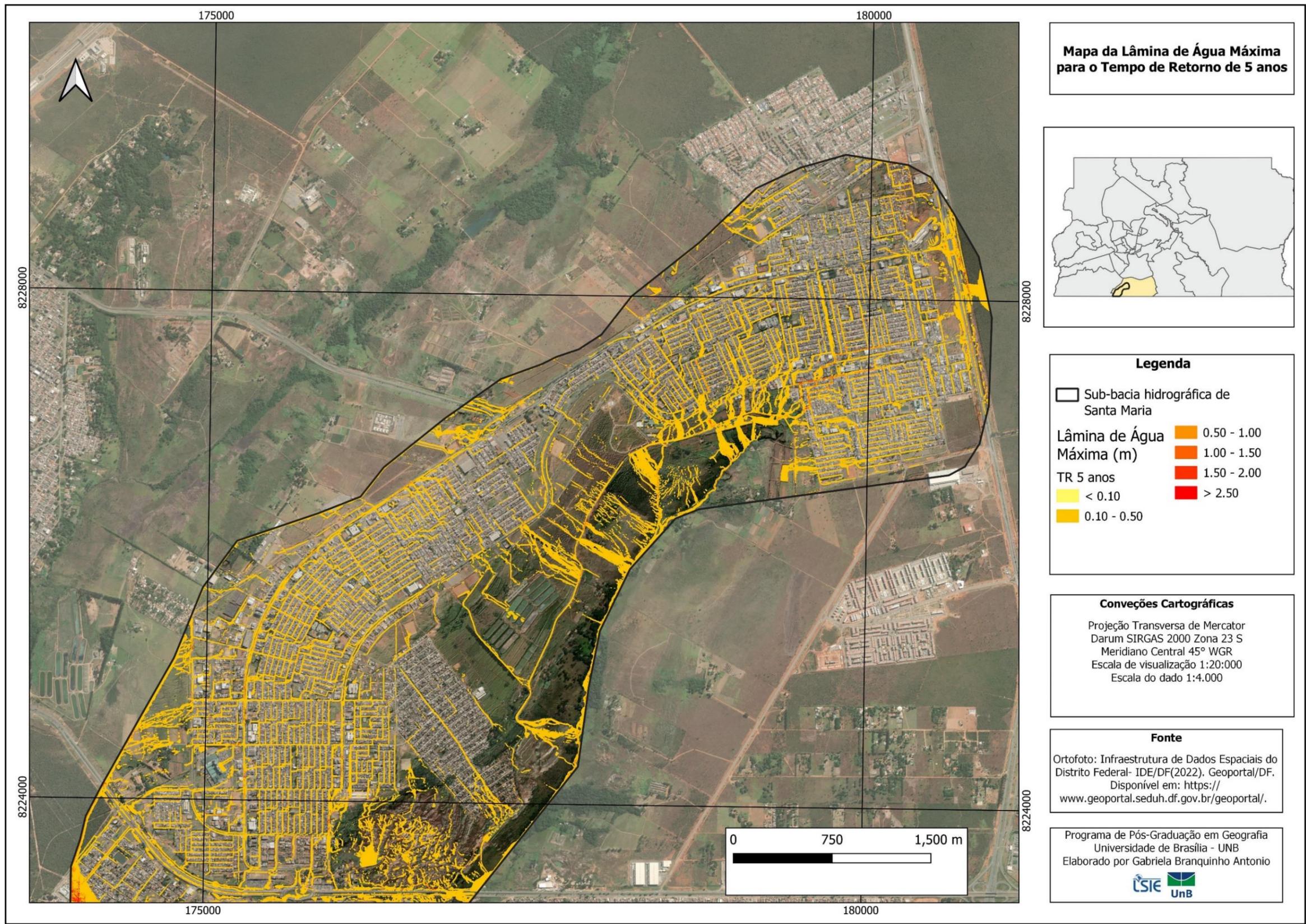


Figura 148 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

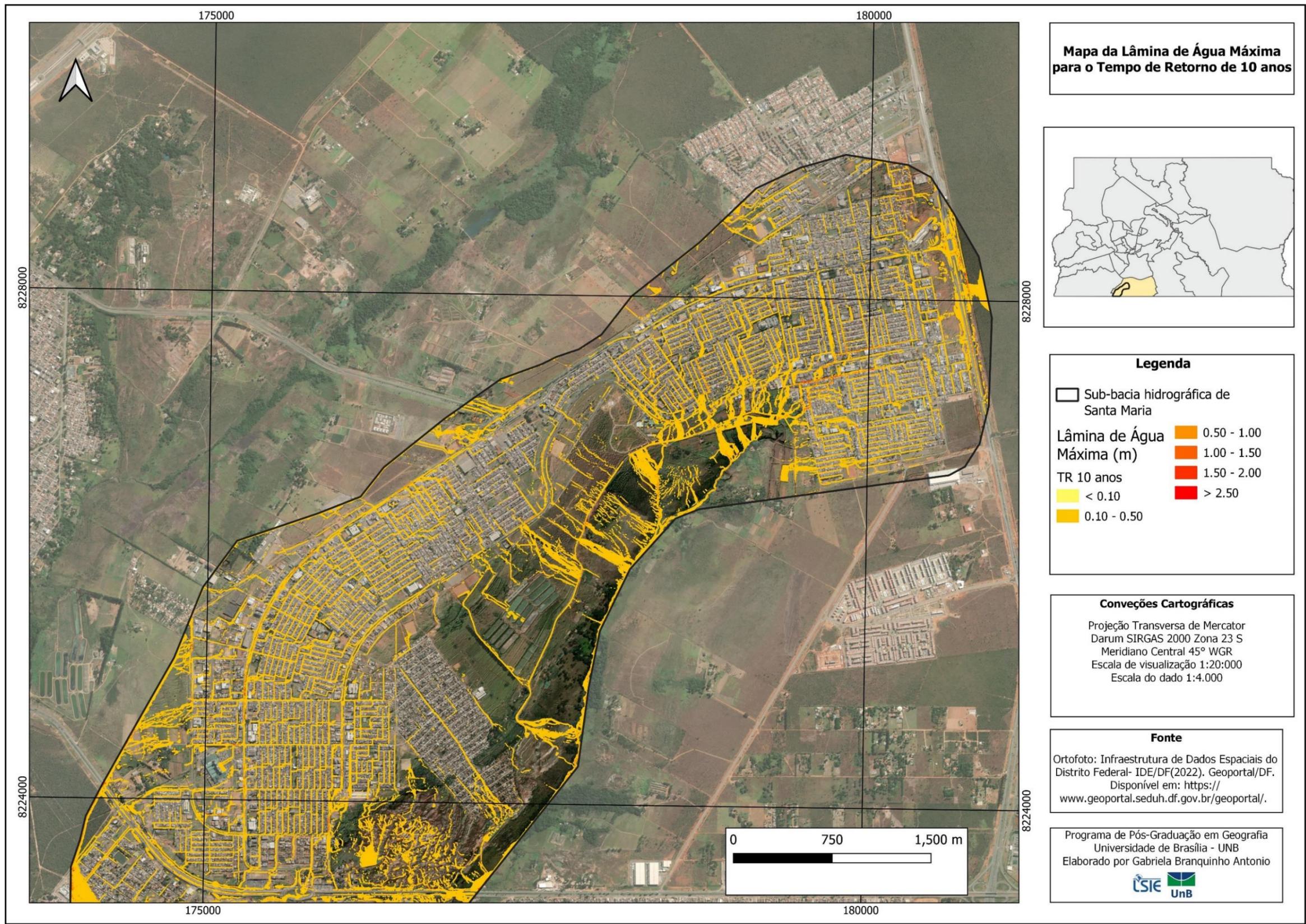


Figura 149 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

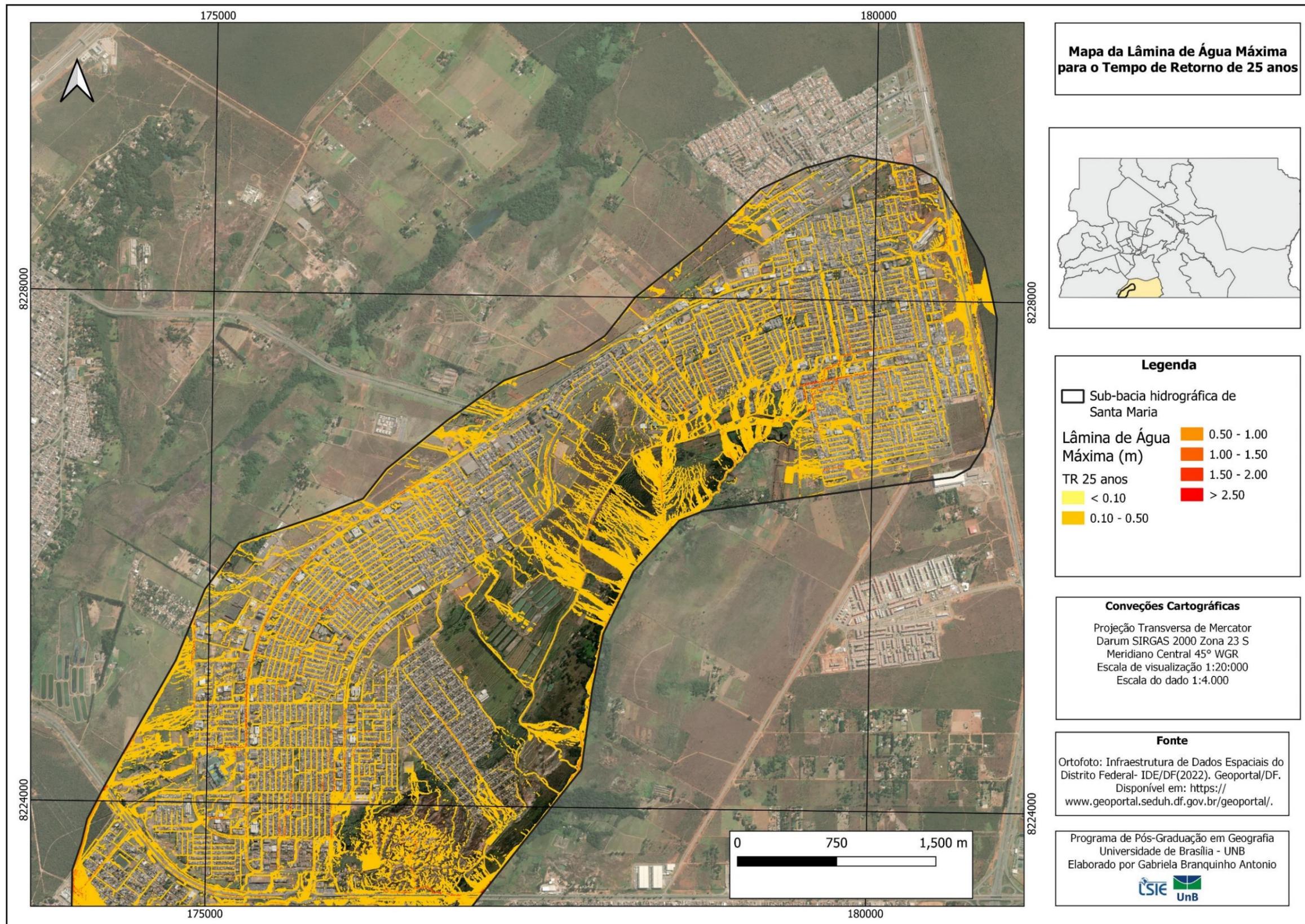


Figura 150 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

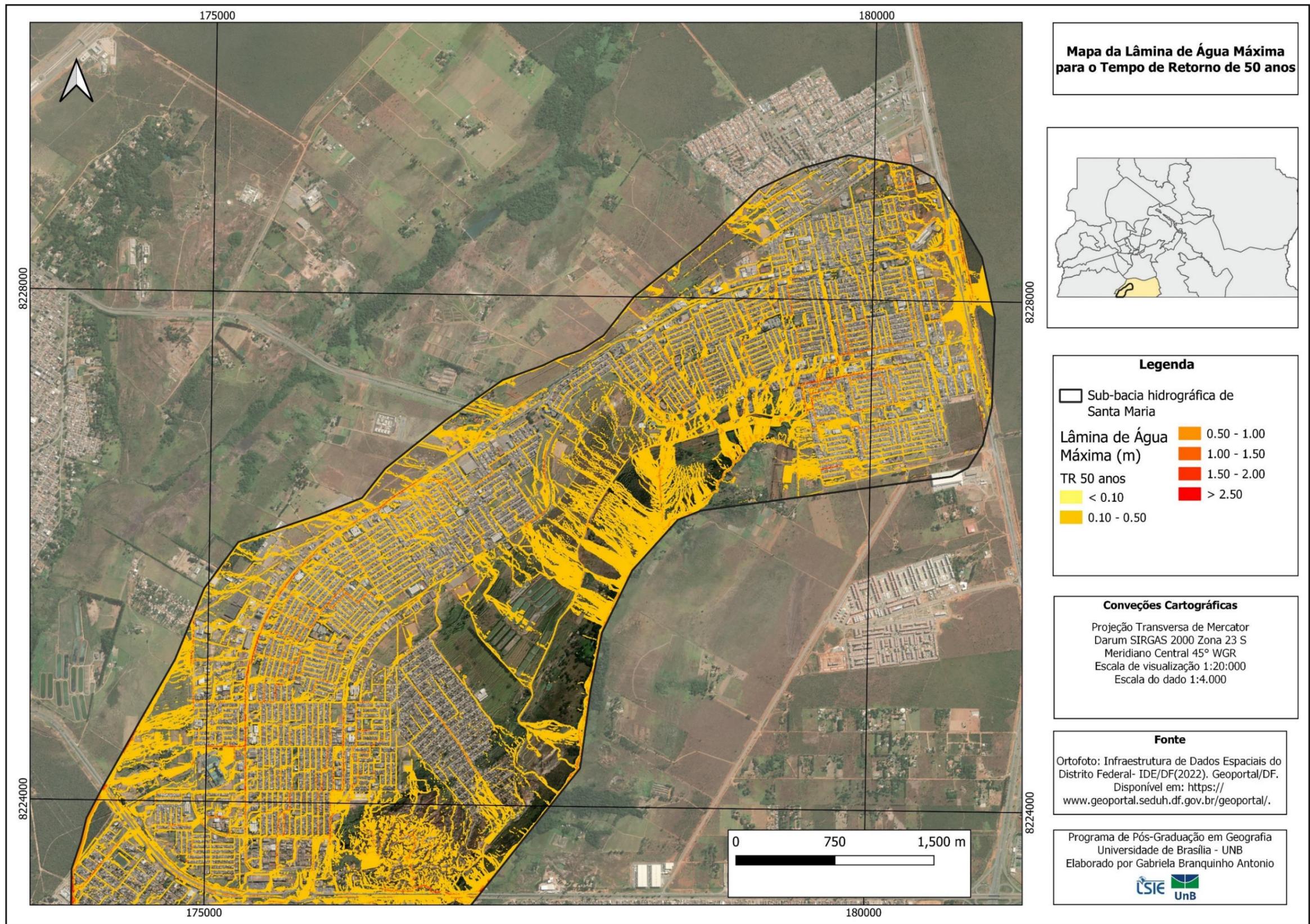


Figura 151 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica da Santa Maria no entorno da Via Alagados – DF.

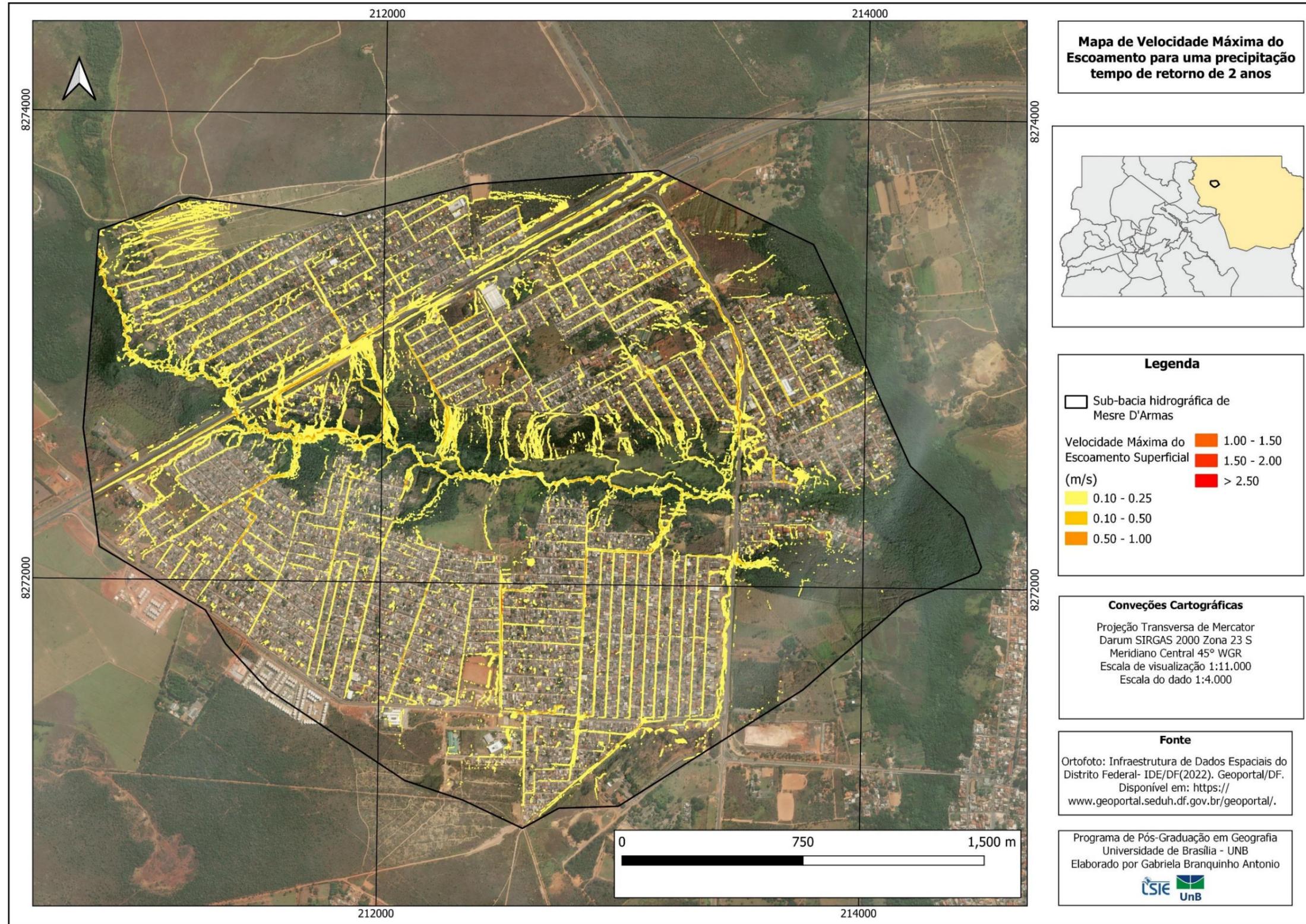


Figura 152 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

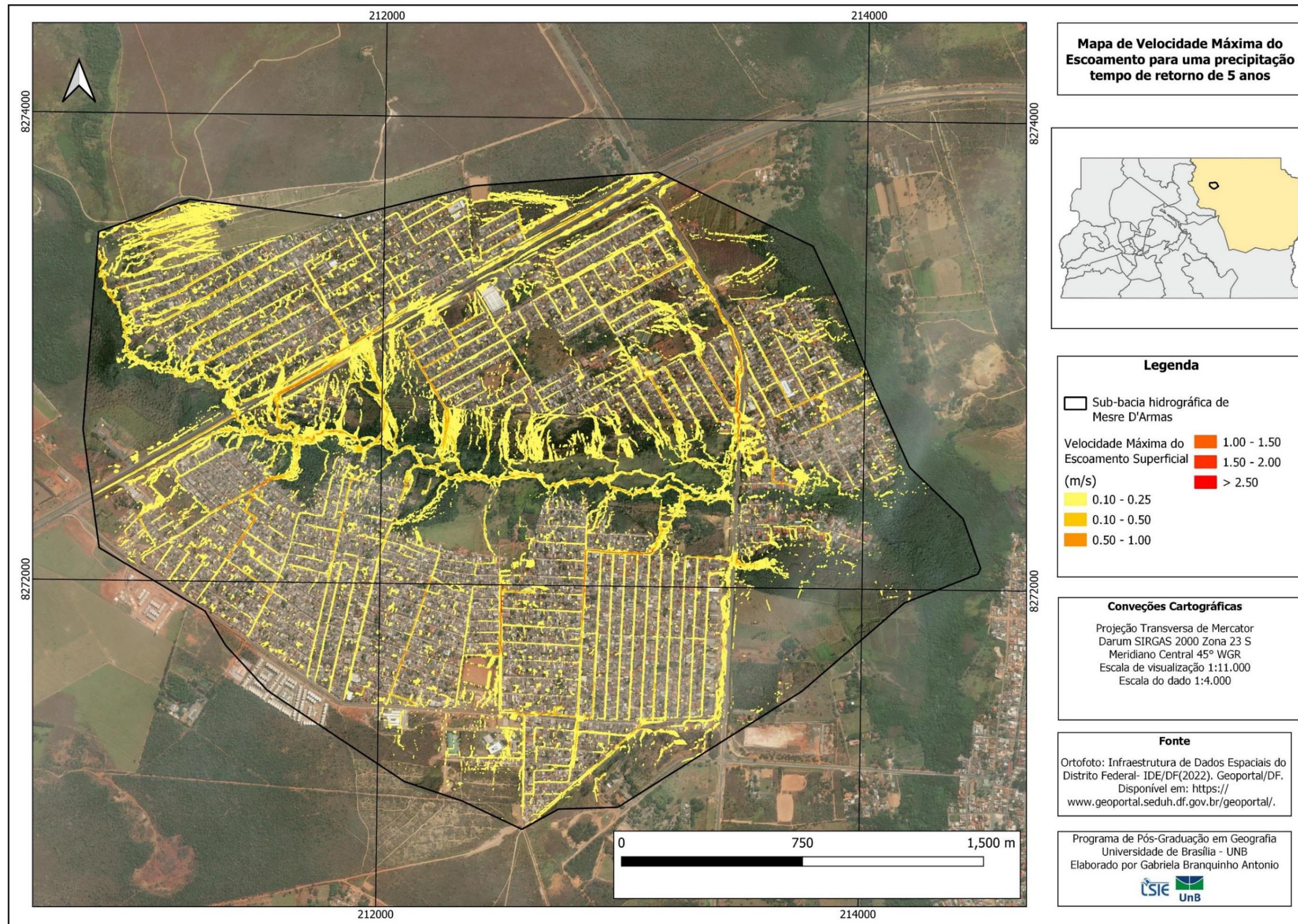


Figura 153 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

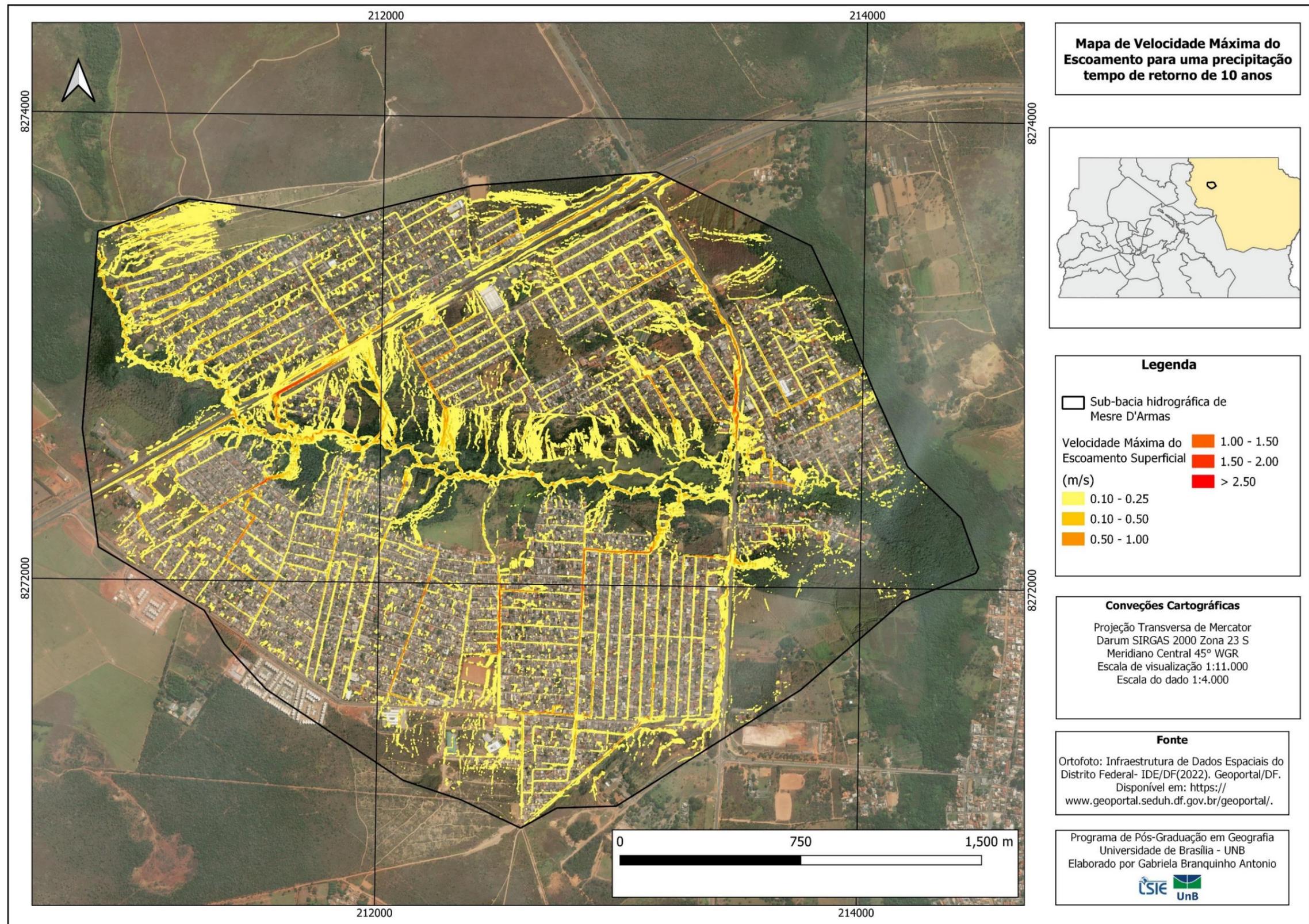


Figura 154 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

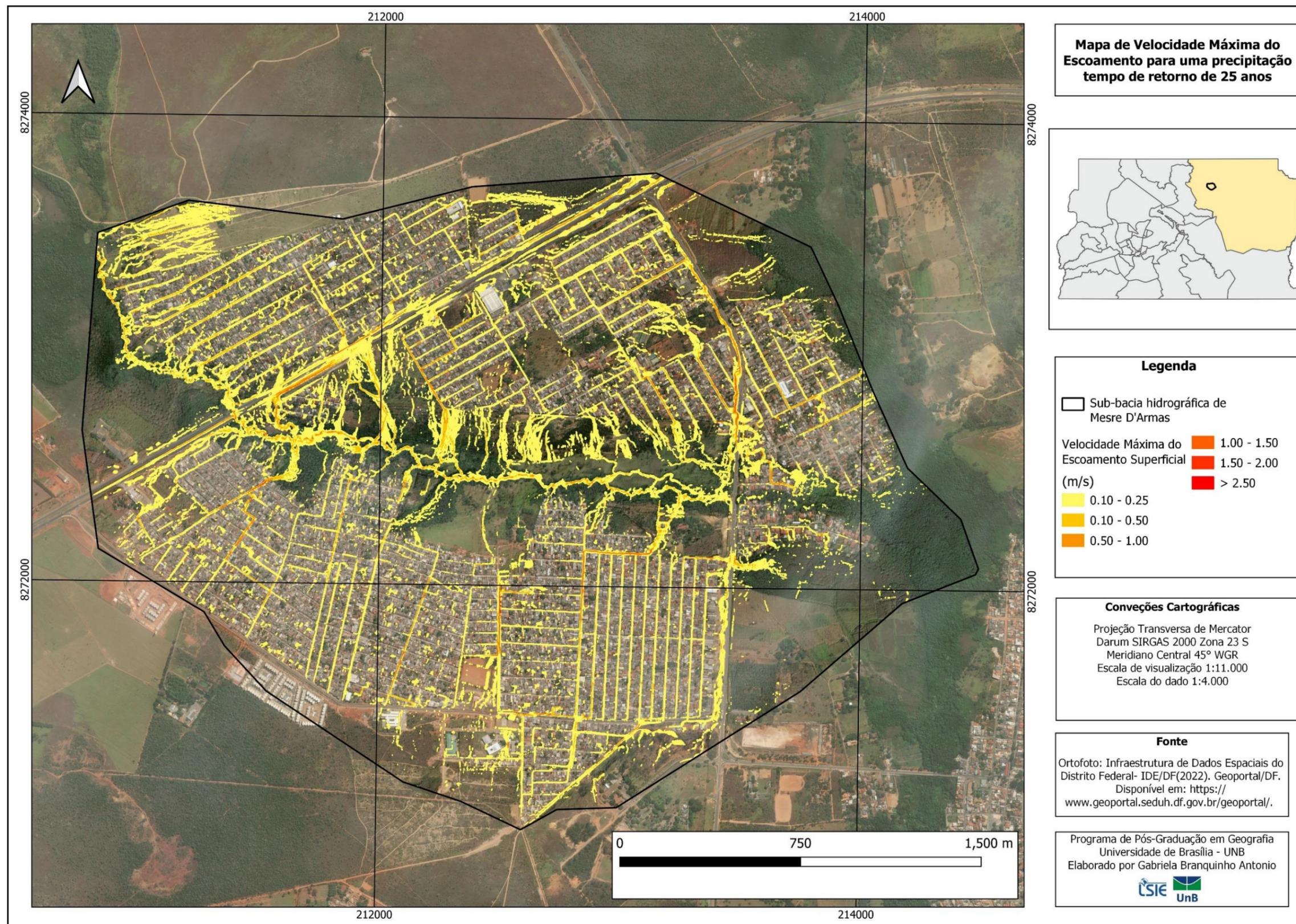


Figura 155 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF..

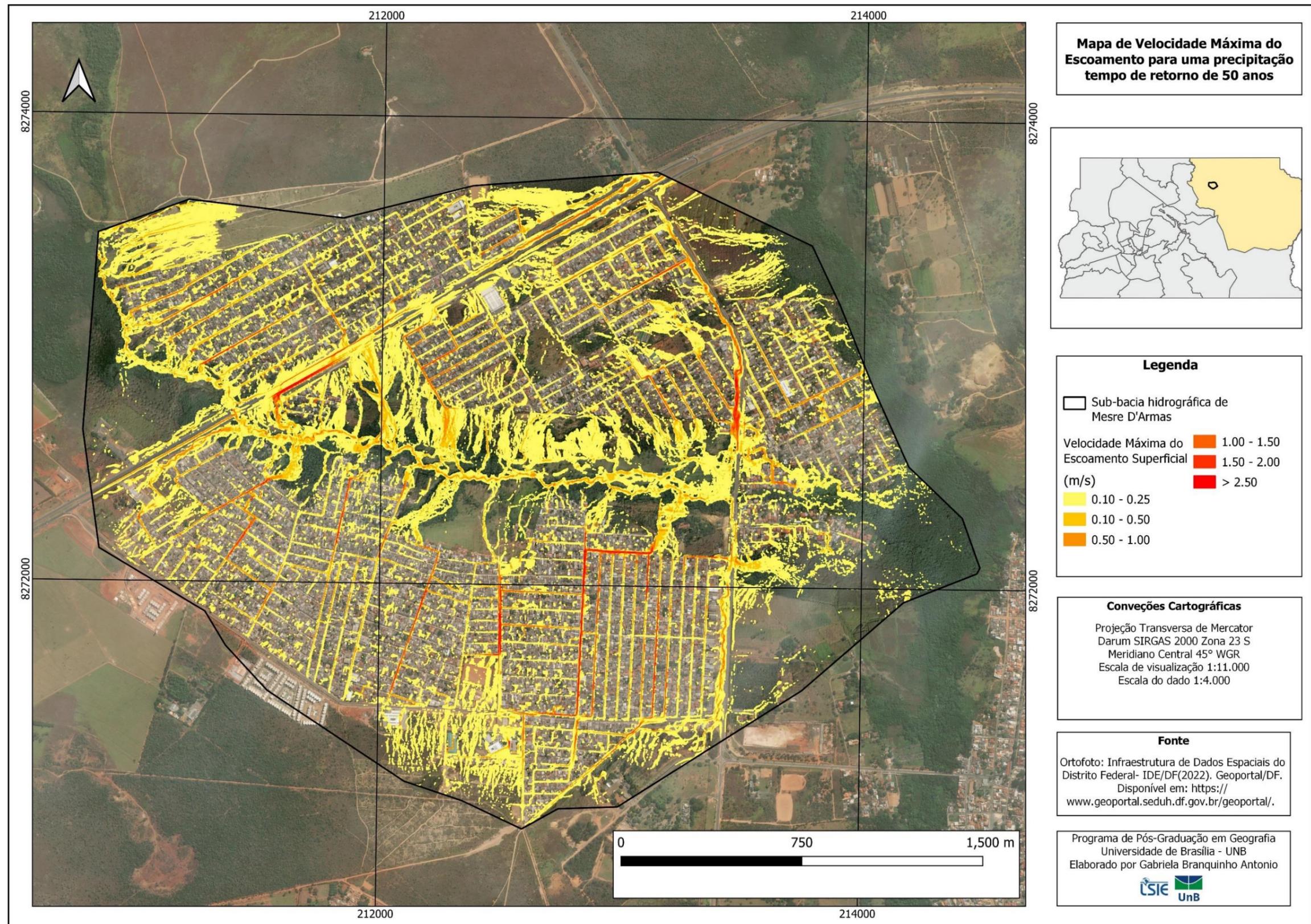


Figura 156 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Mestre D'Armas – DF.

APÊNDICE L: VICENTE PIRES, ARINE VICENTE PIRES, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)

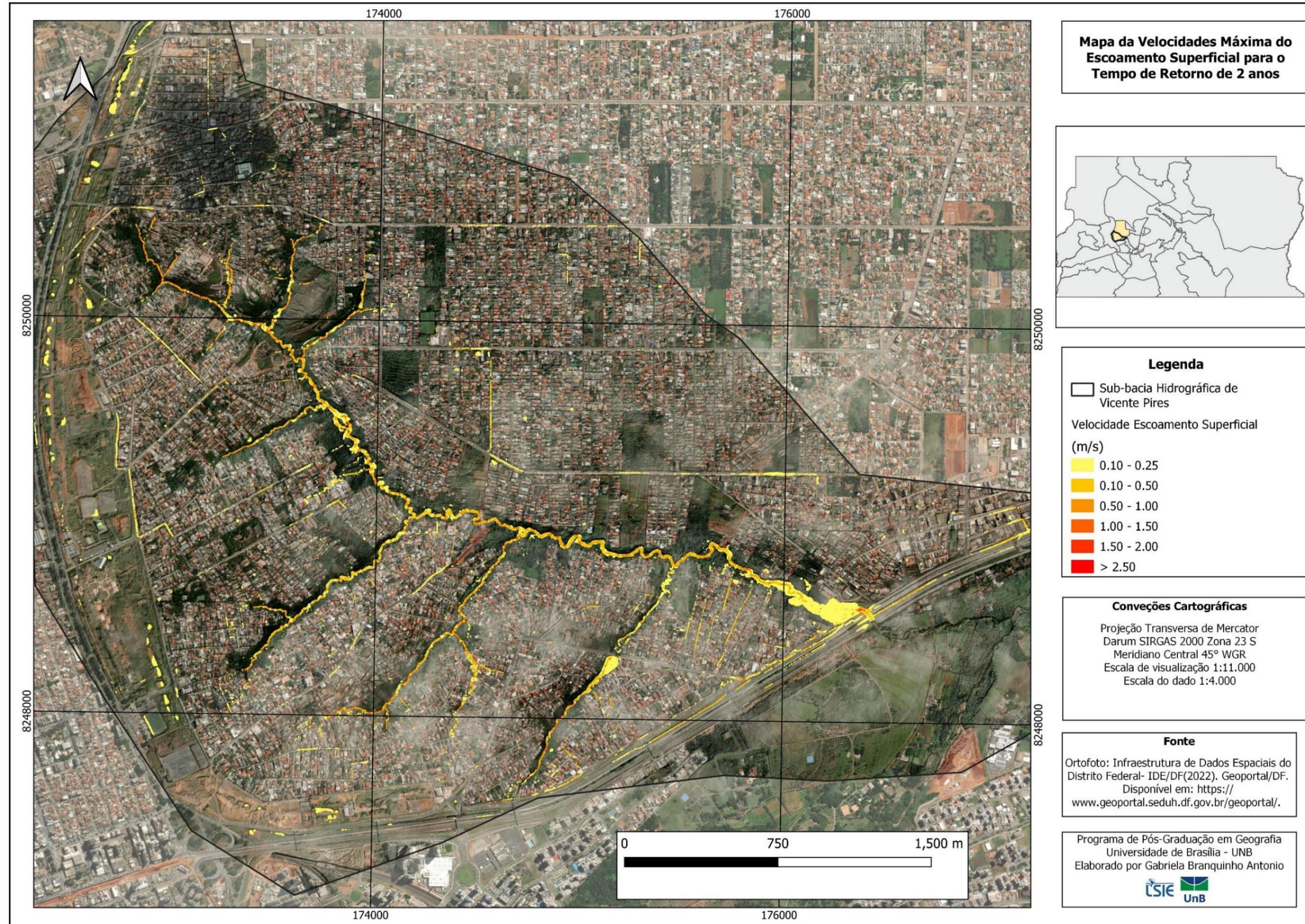


Figura 157 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

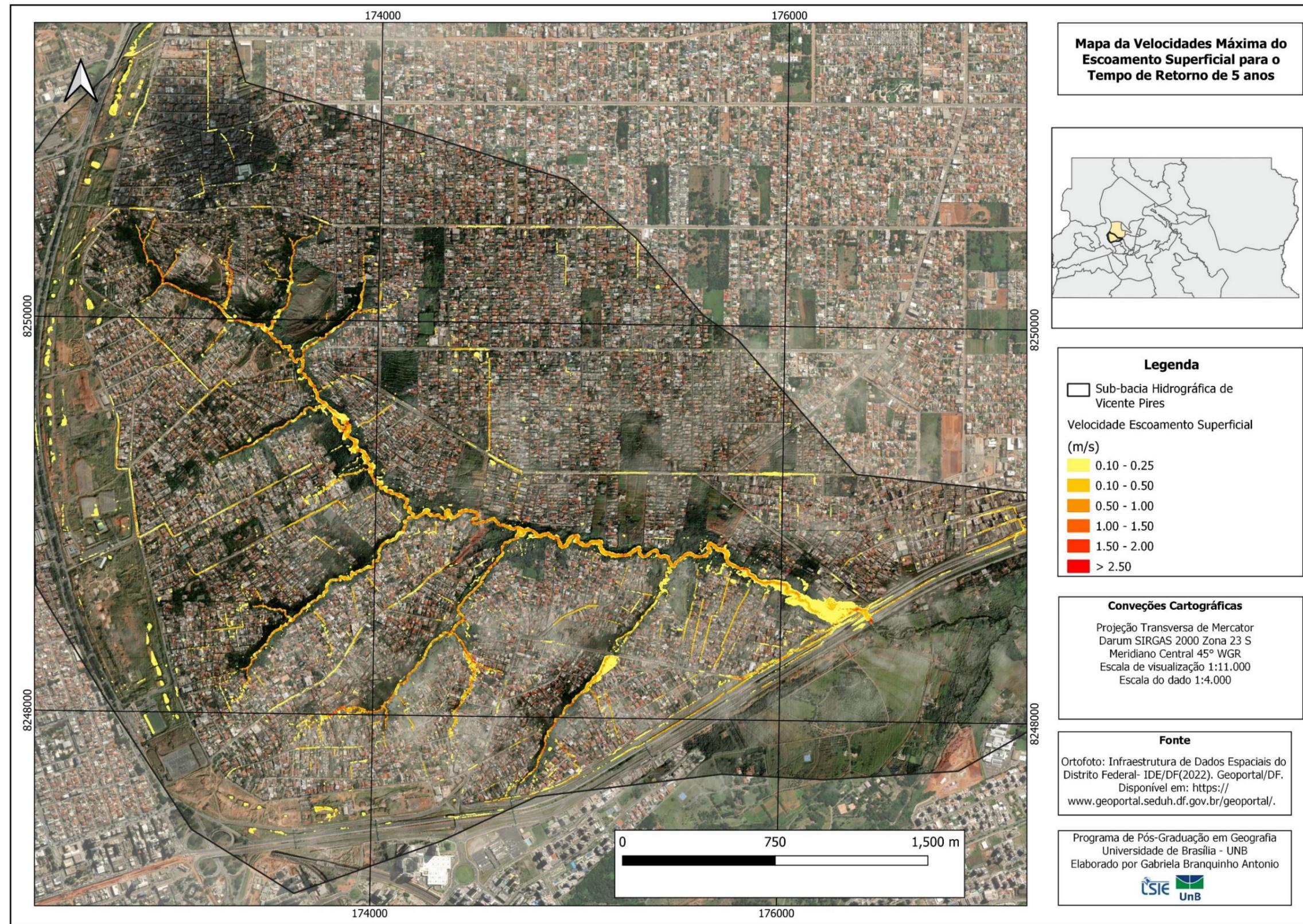


Figura 158 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

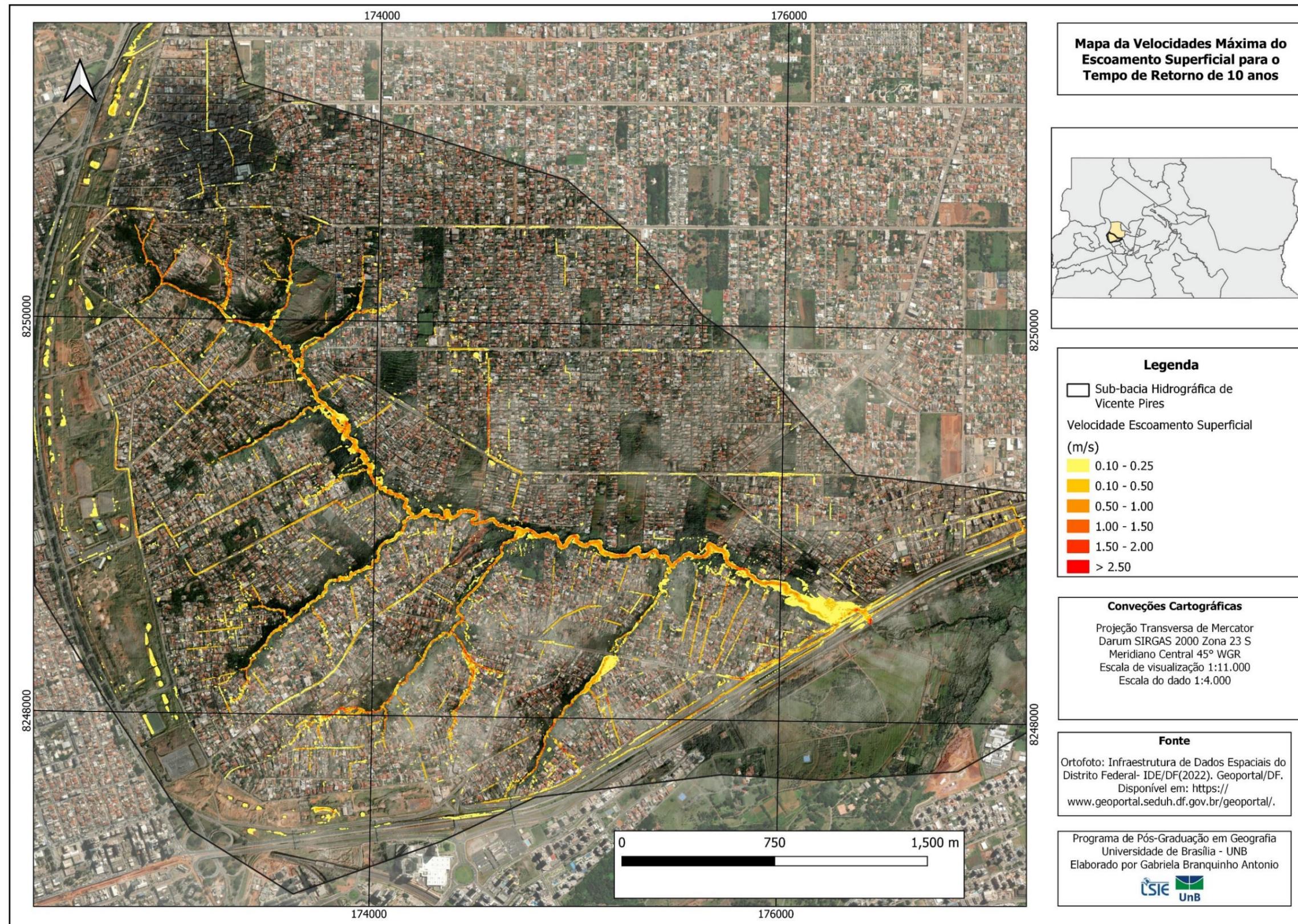


Figura 159 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

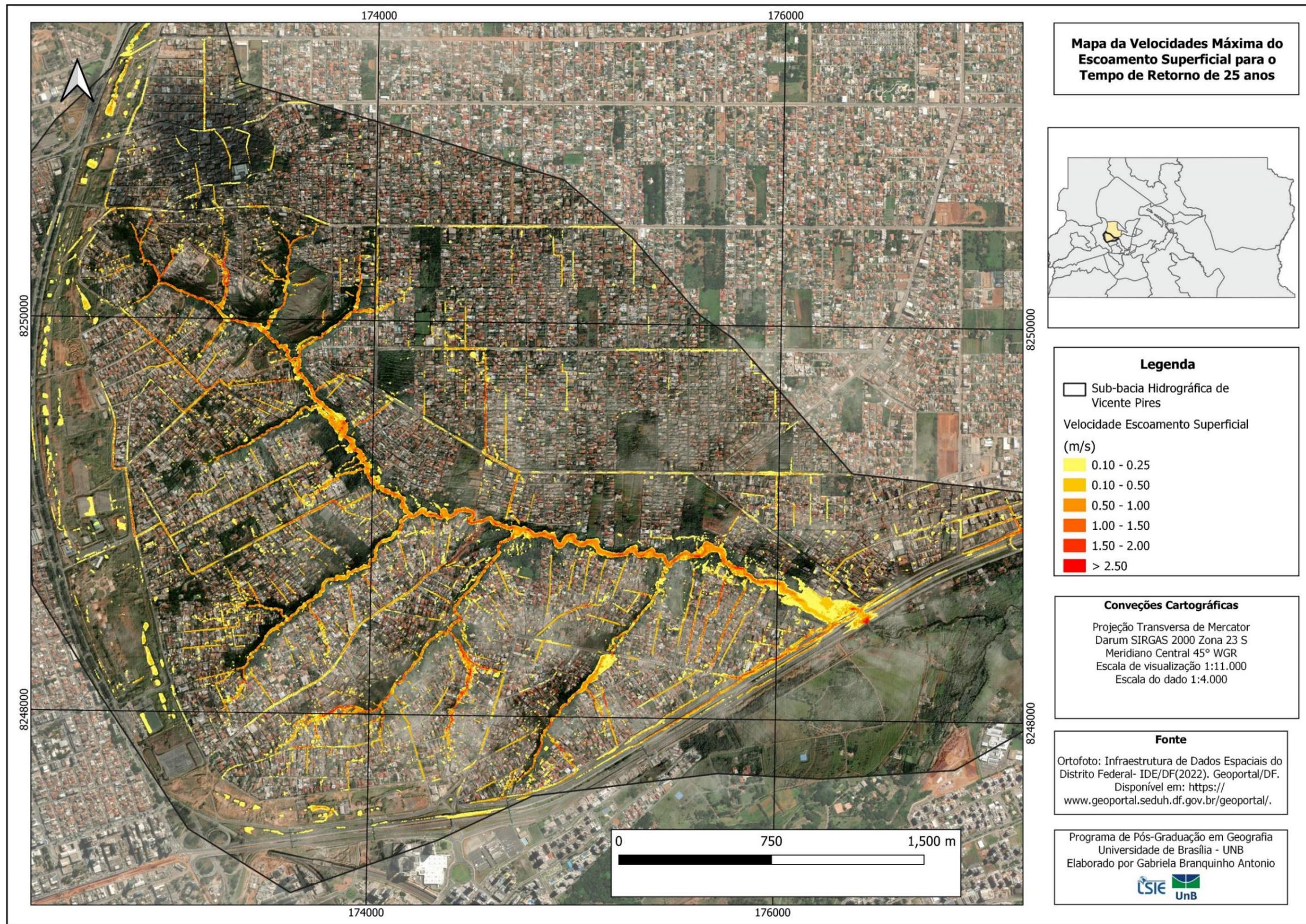


Figura 160 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

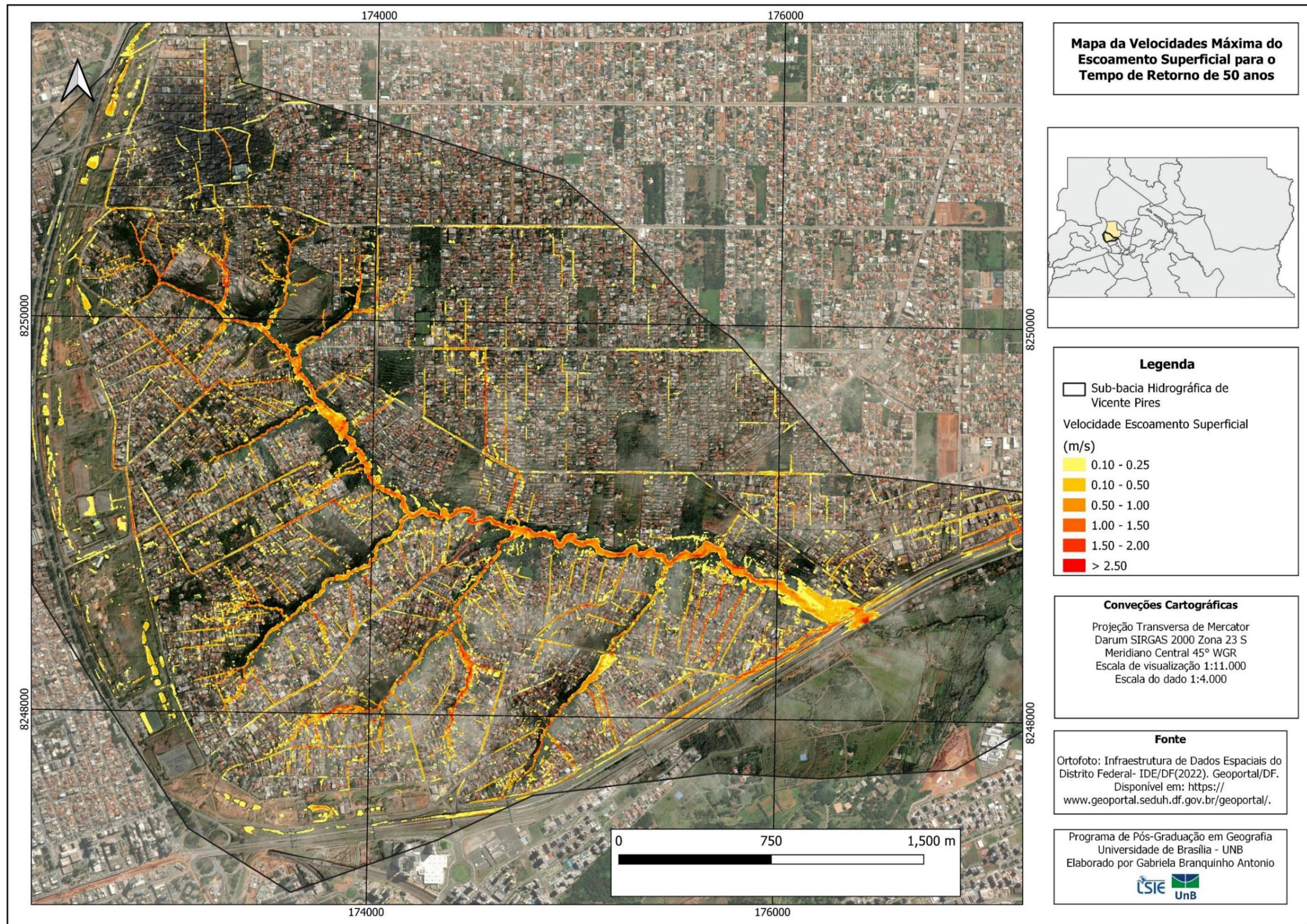


Figura 161 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vicente Pires – DF.

APÊNDICE M: NÚCLEO BANDEIRANTES, ARIS VILA CAUHY, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)

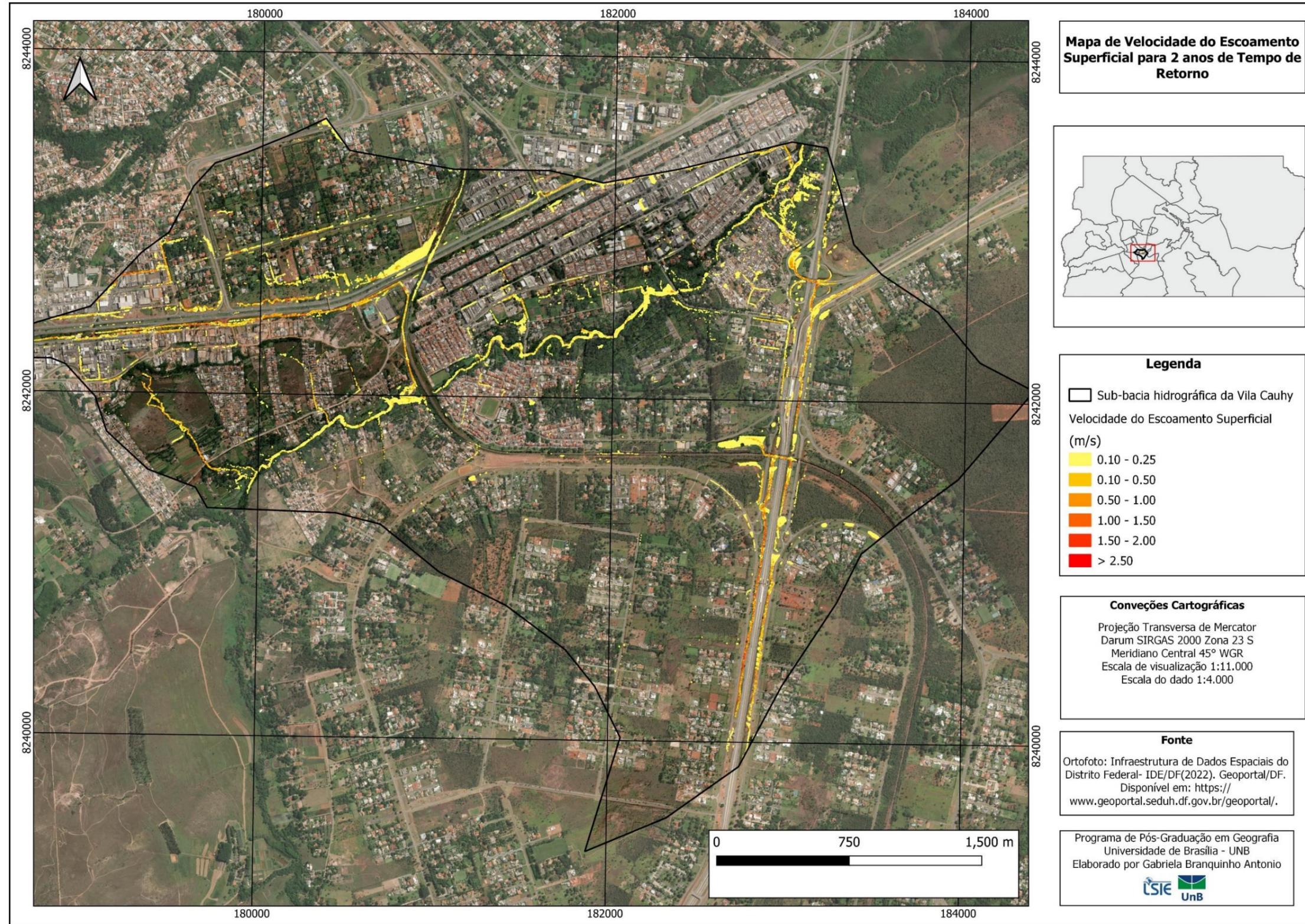


Figura 162 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

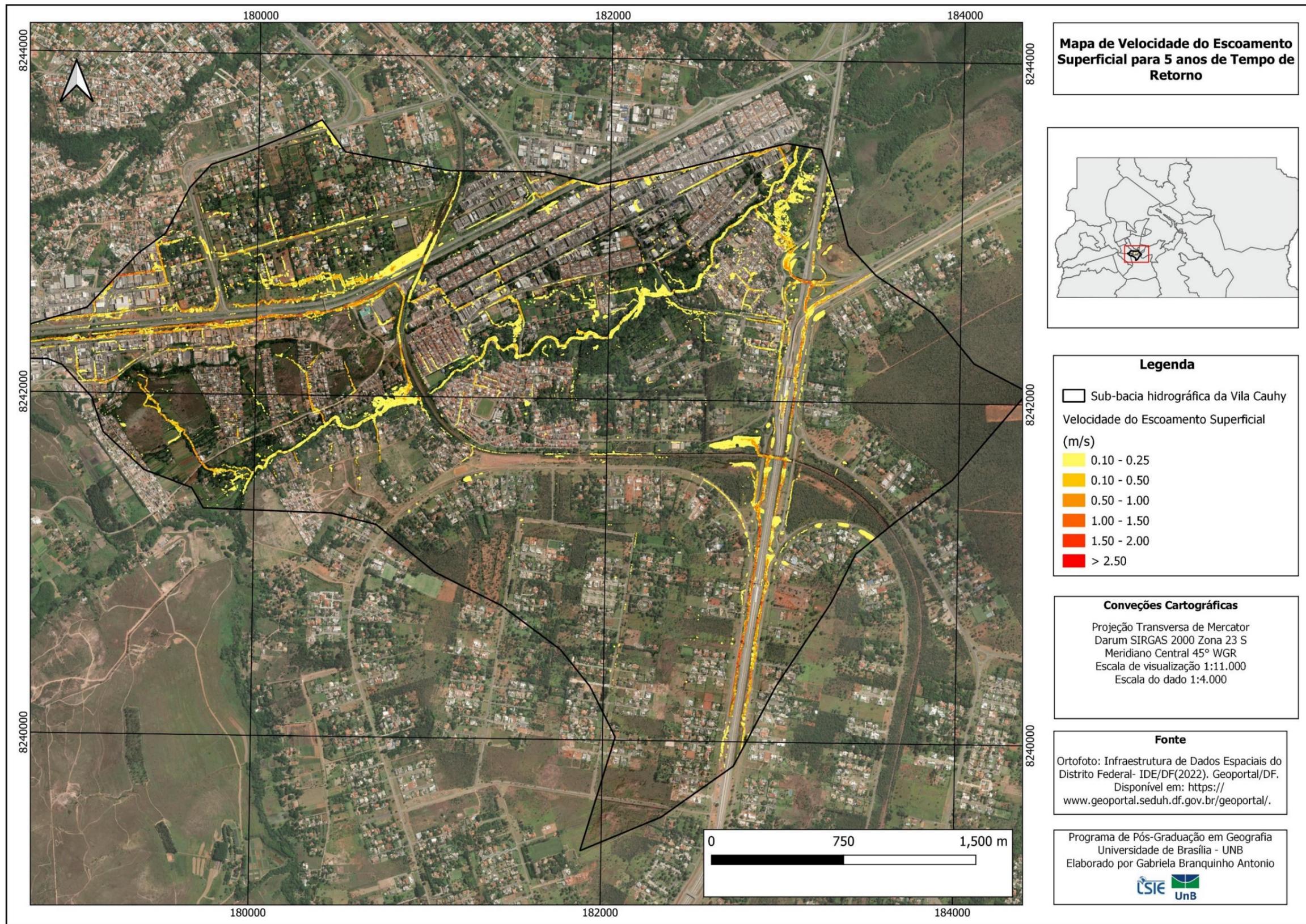


Figura 163 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

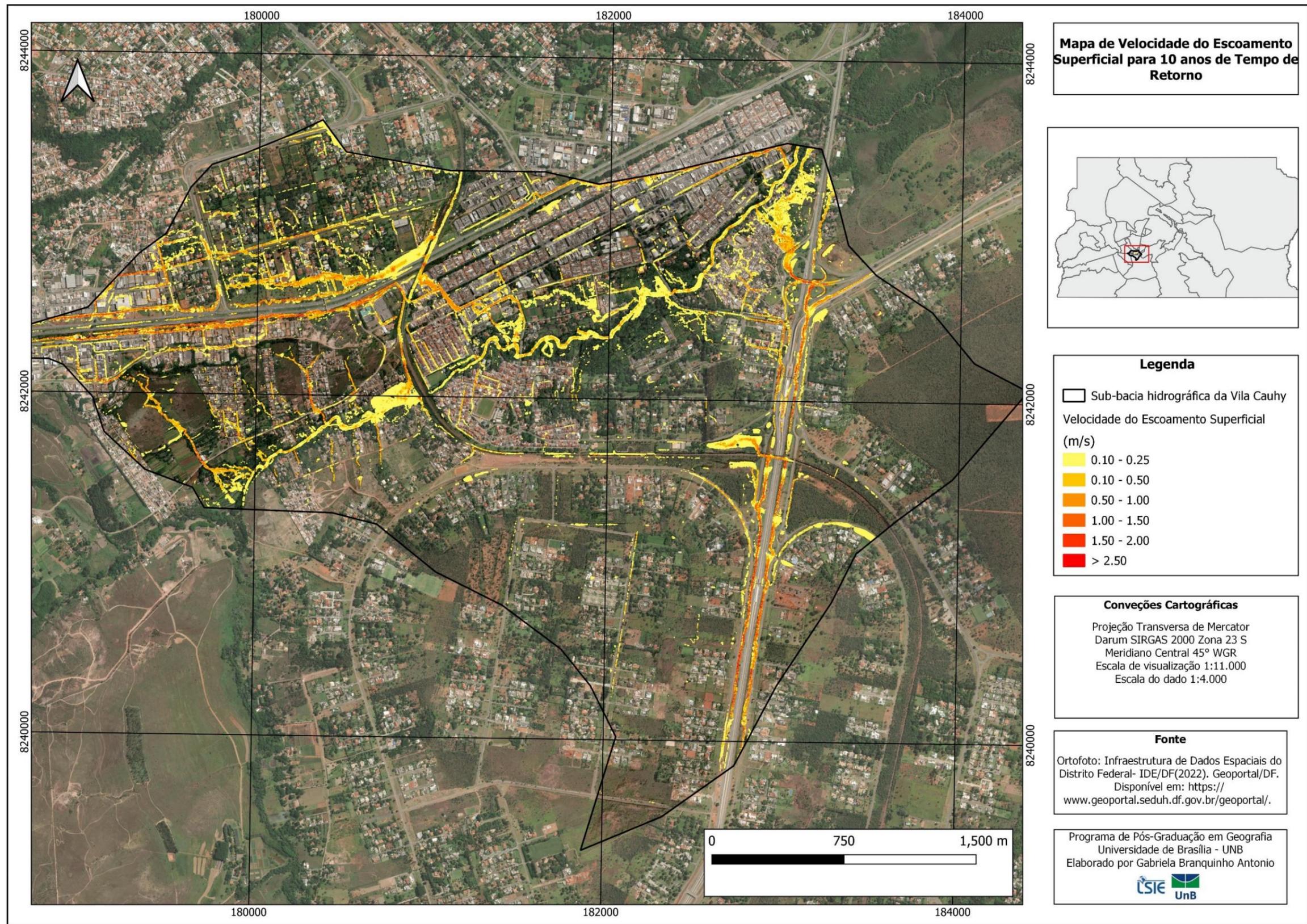


Figura 164 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

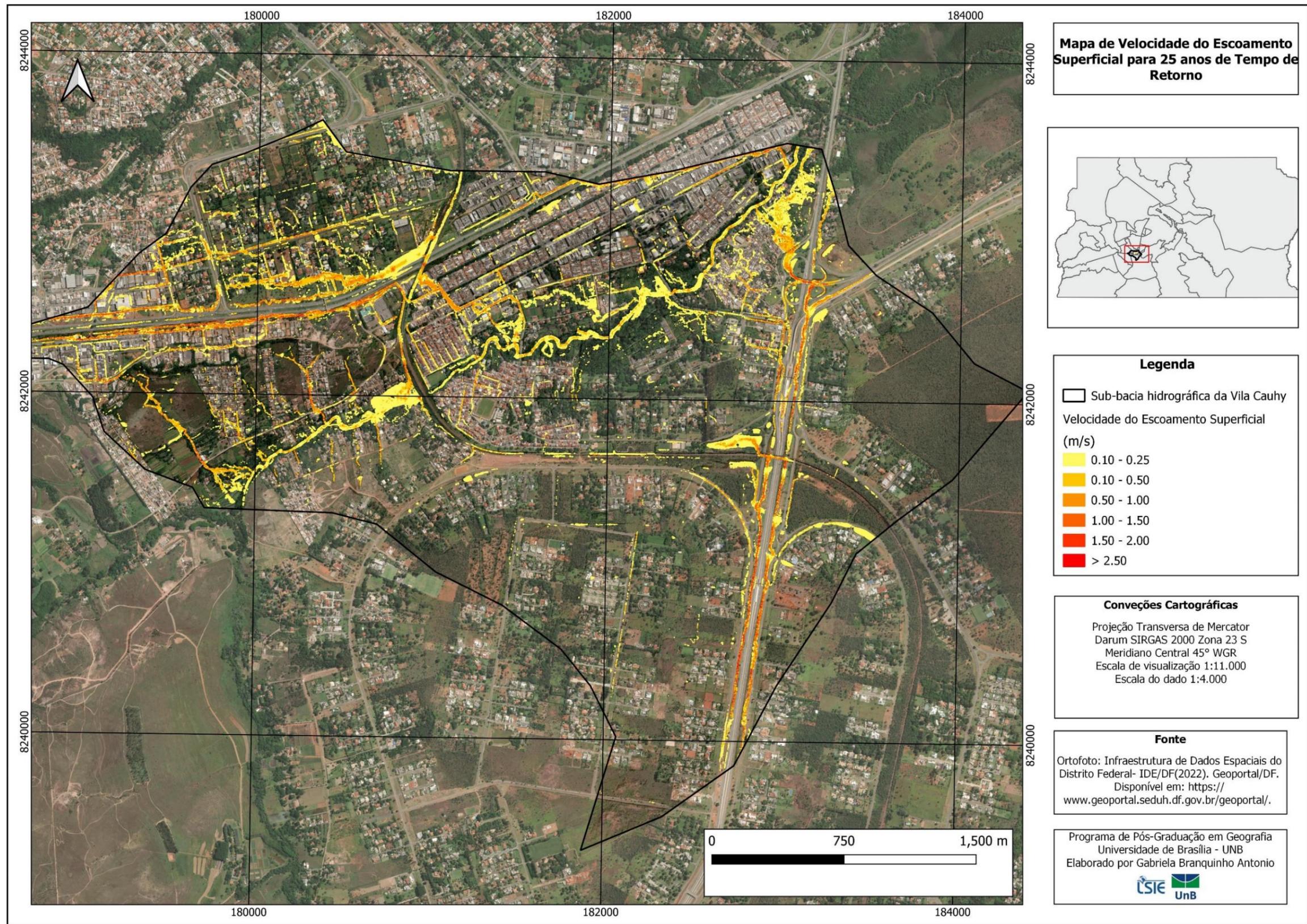


Figura 165 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 25 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

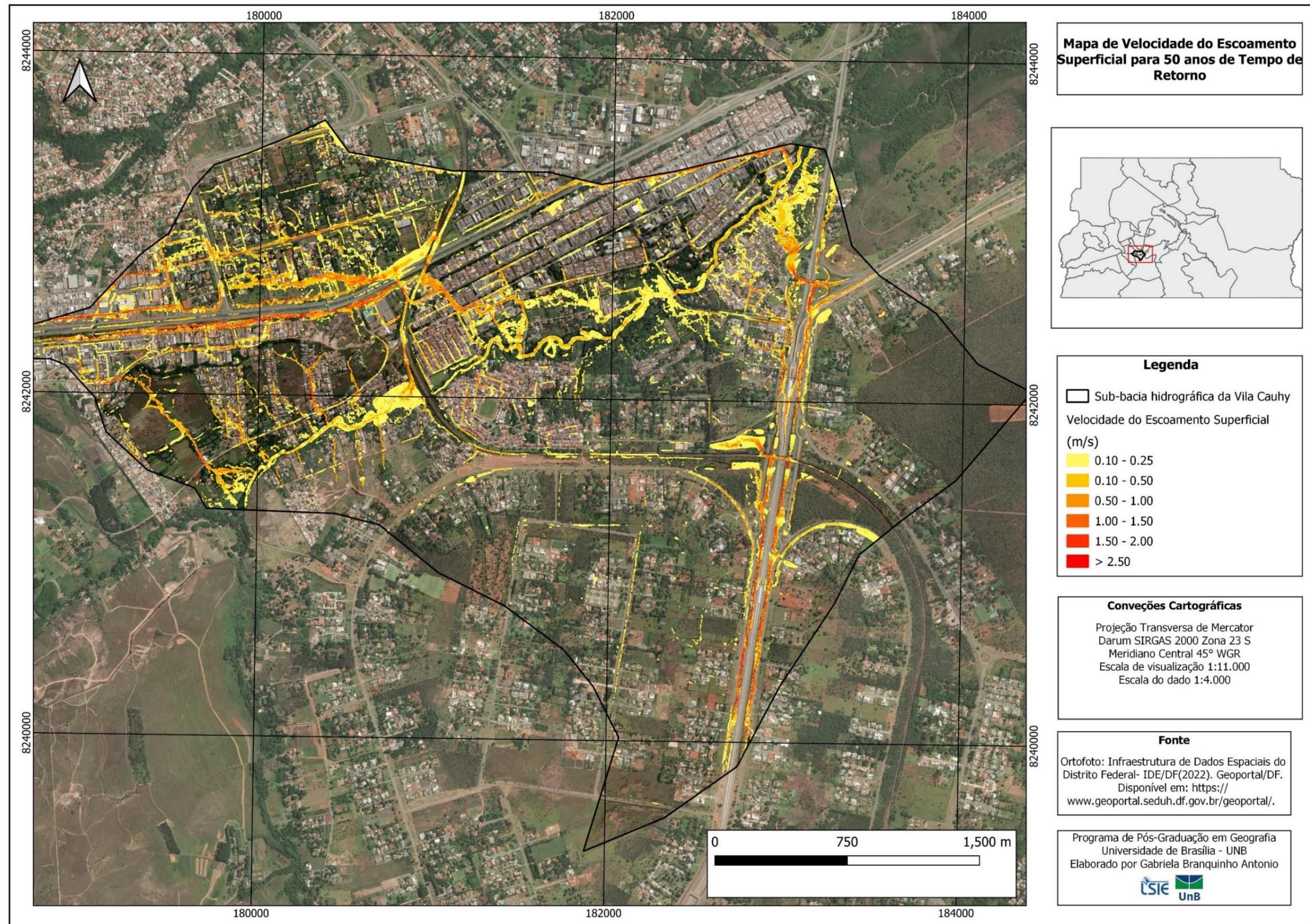


Figura 166 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Vila Cauhy – DF.

APÊNDICE N: PÔR DO SOL/SOL NASCENTE, VELOCIDADE MÁXIMA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (M/S)

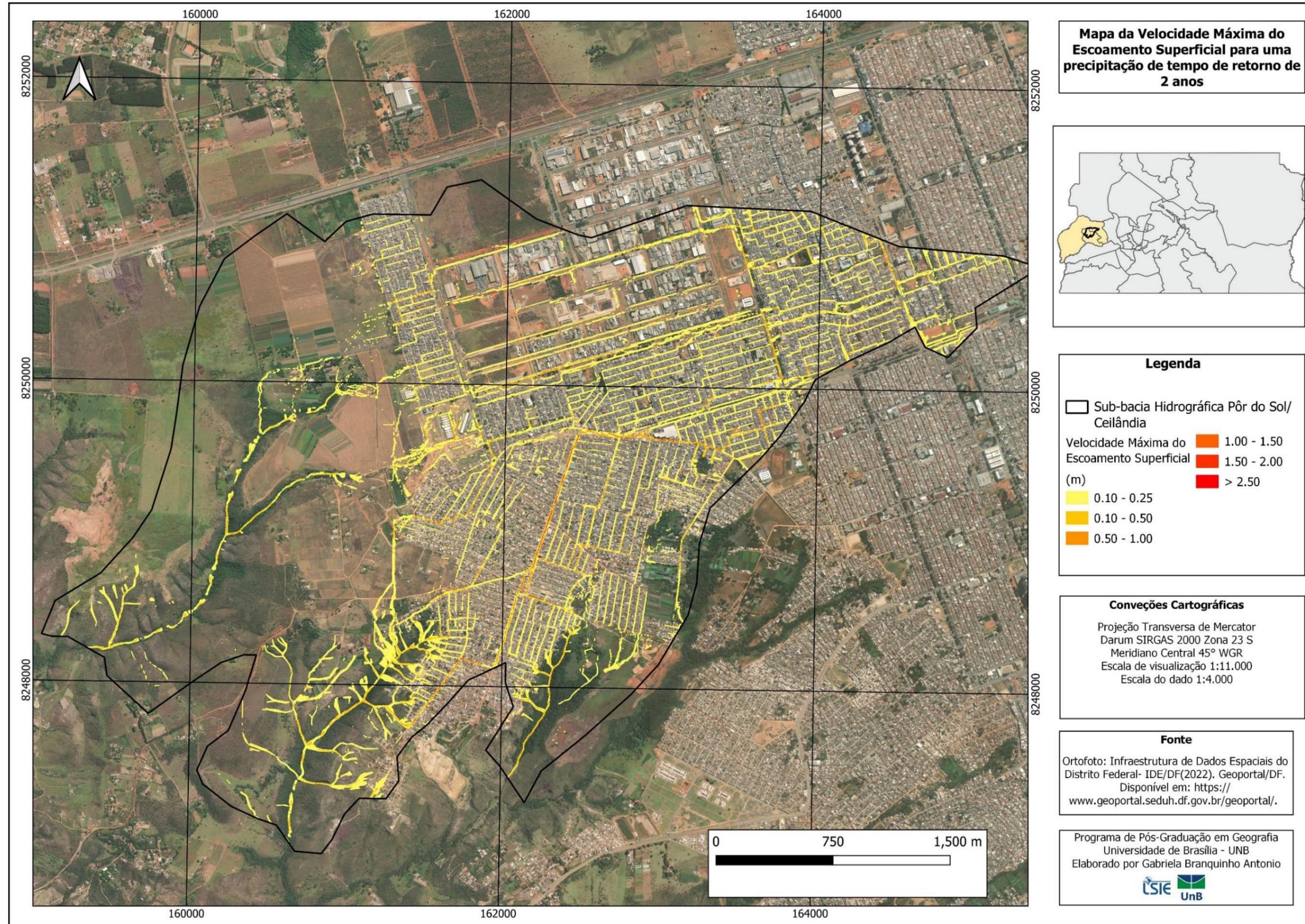


Figura 167 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 2 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

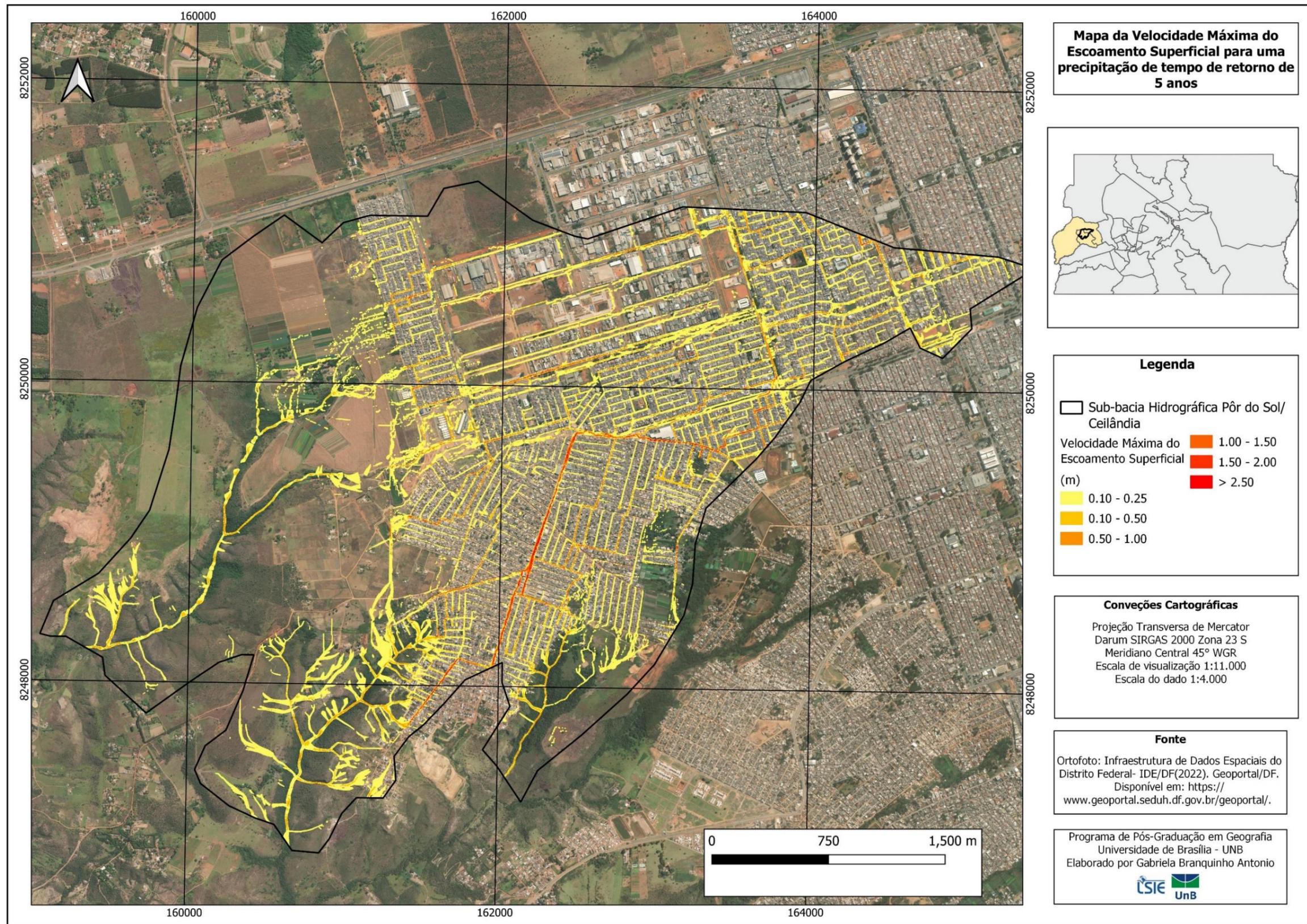


Figura 168 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 5 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

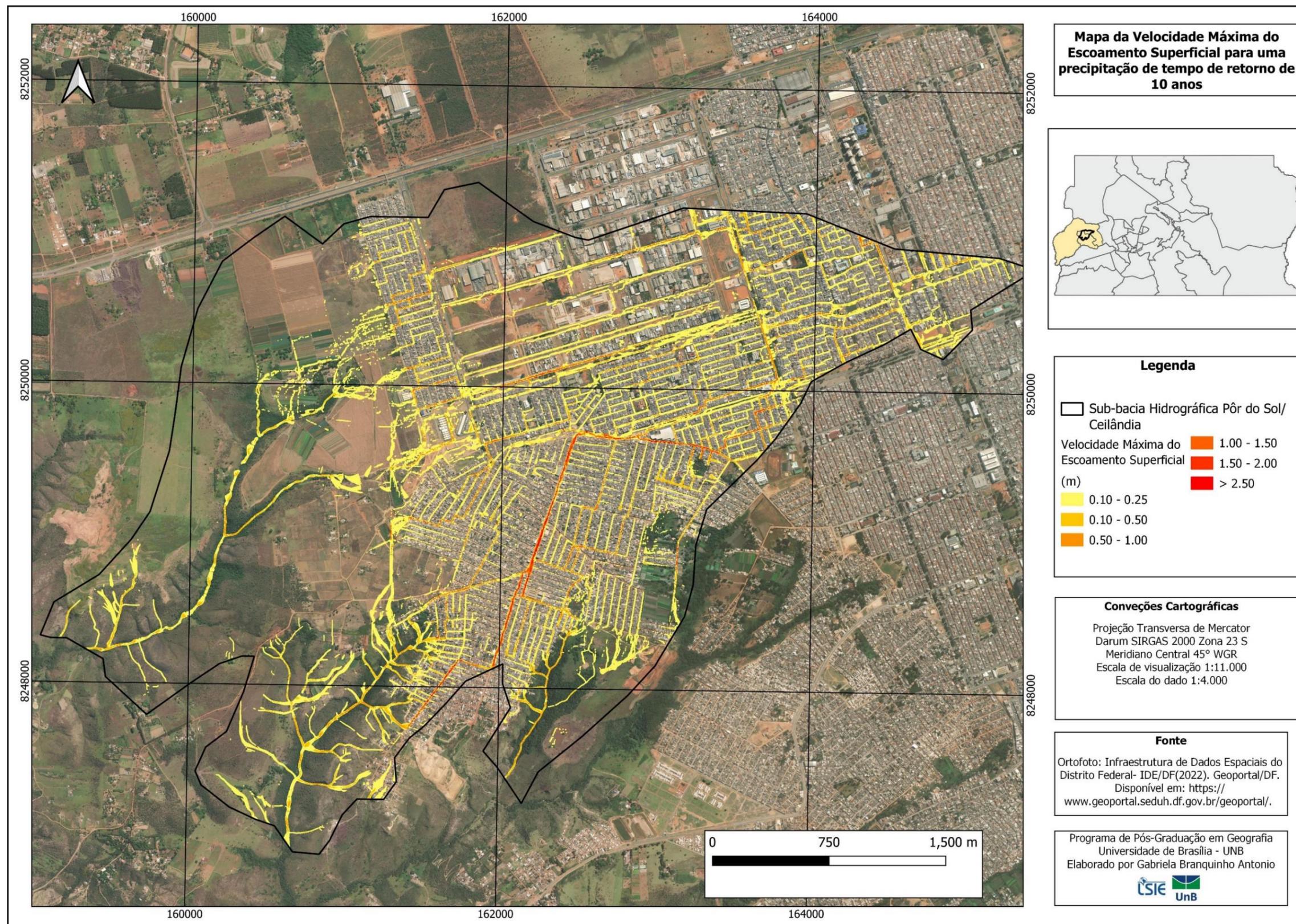


Figura 169 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 10 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

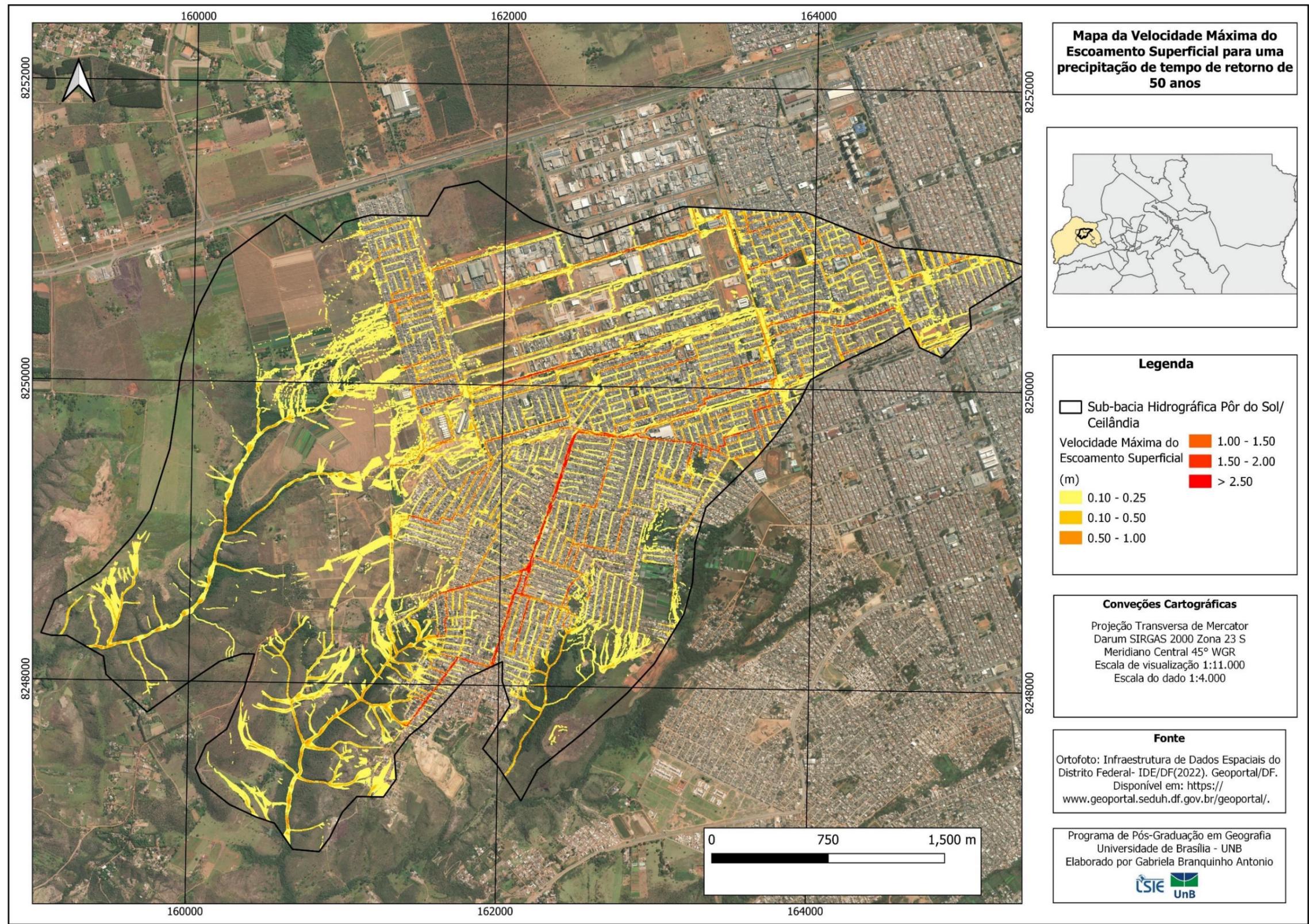


Figura 170 - Mapa da velocidade máxima do escoamento superficial (m/s) para uma precipitação de tempo de retorno de 50 anos para a sub-bacia hidrográfica Pôr do Sol/Sol Nascente e Ceilândia – DF.

APÊNDICE O: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS SOBRECARRREGADOS

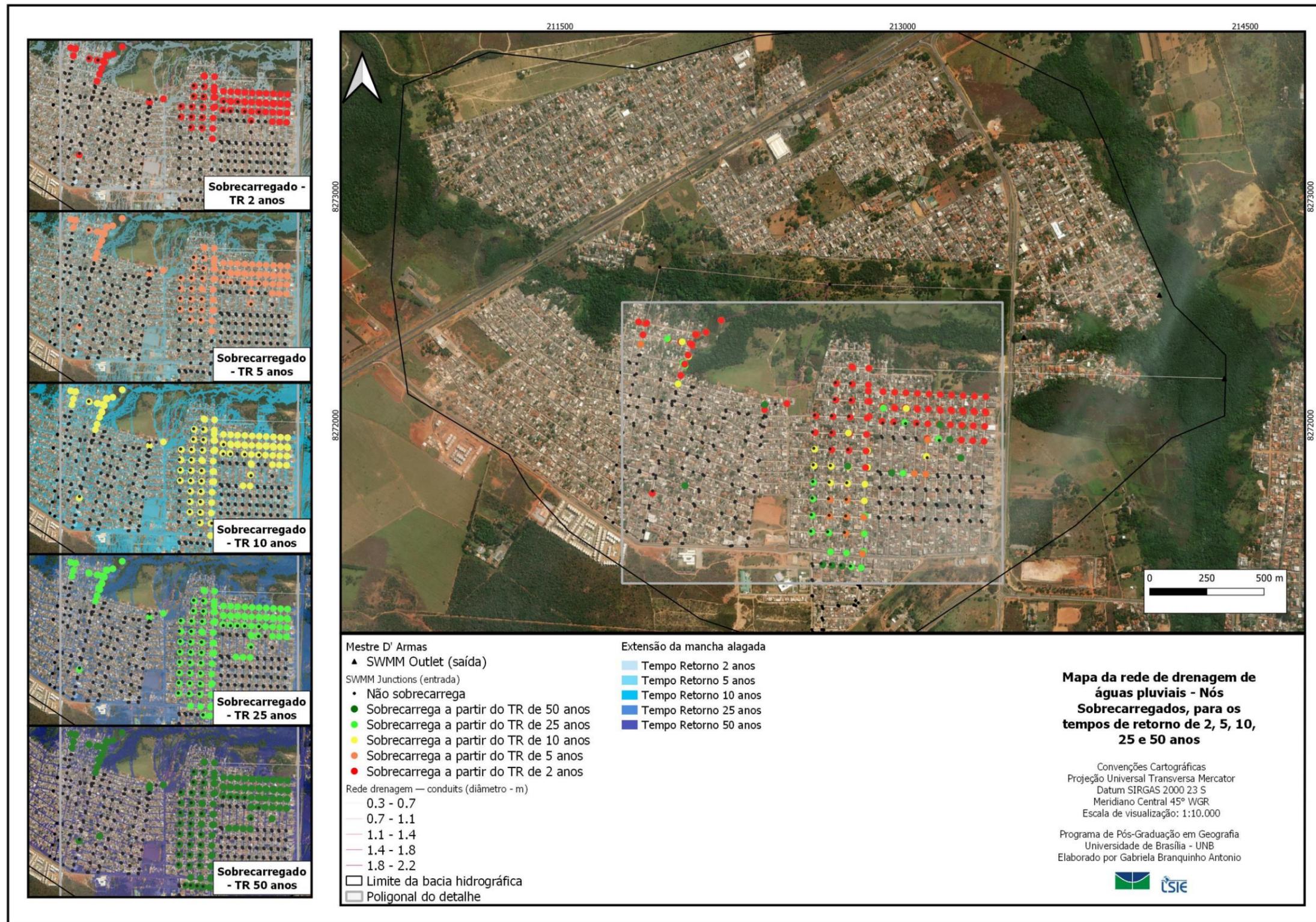


Figura 171 – Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Mestre D' Armas, Planaltina, Distrito Federal.

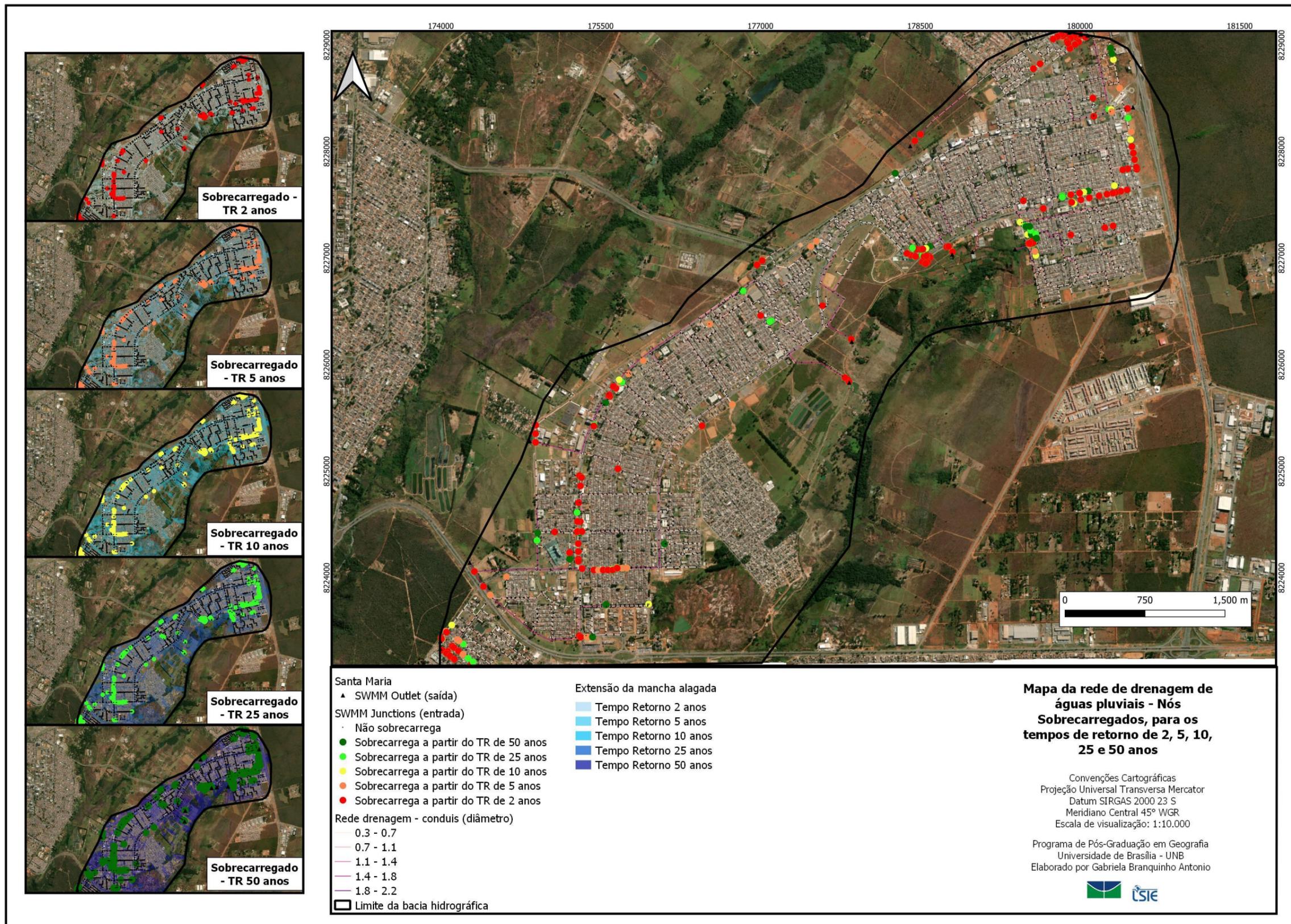


Figura 172 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Santa Maria, Distrito Federal.

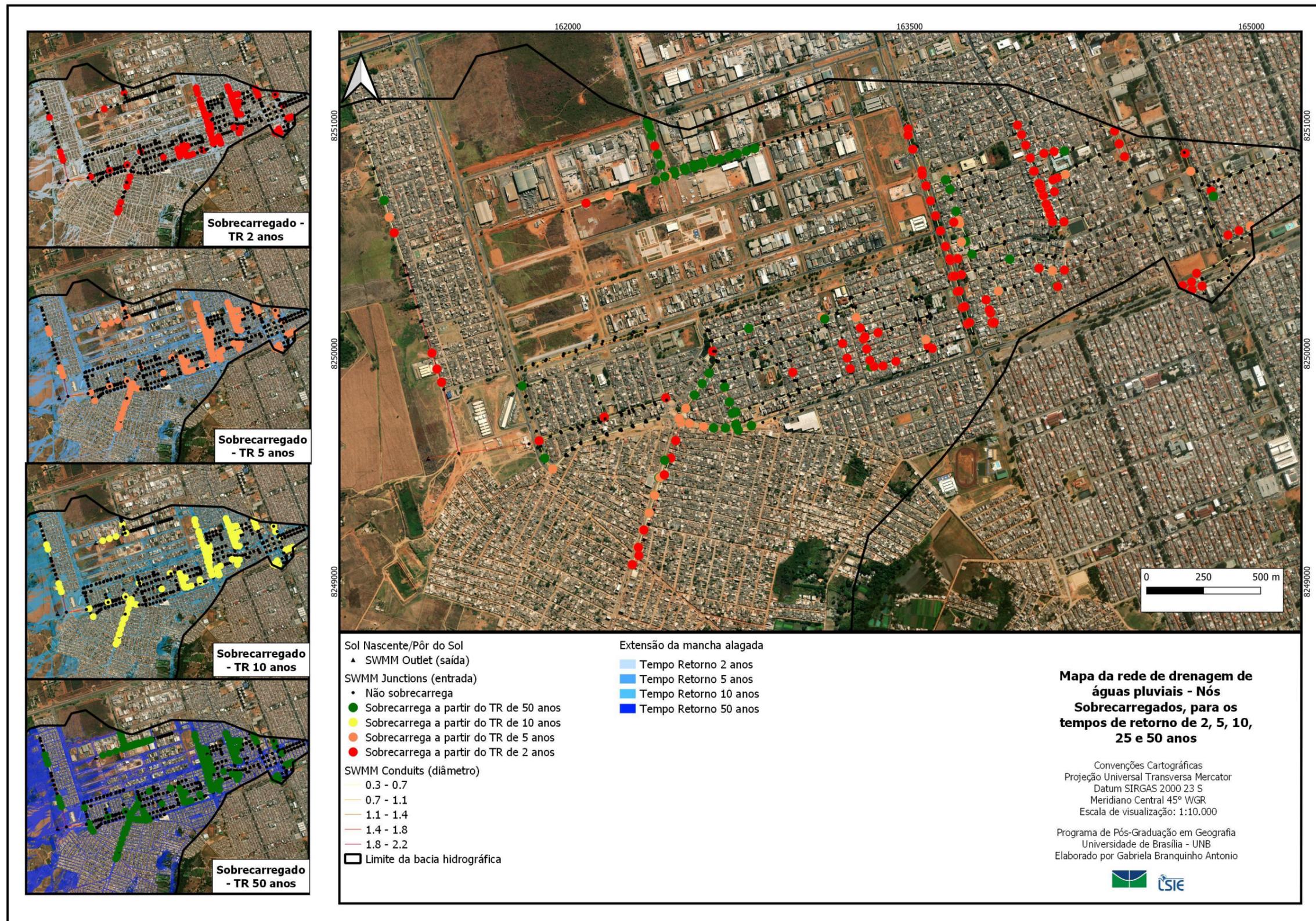


Figura 173 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Sol Nascente/Pôr do Sol, Distrito Federal.

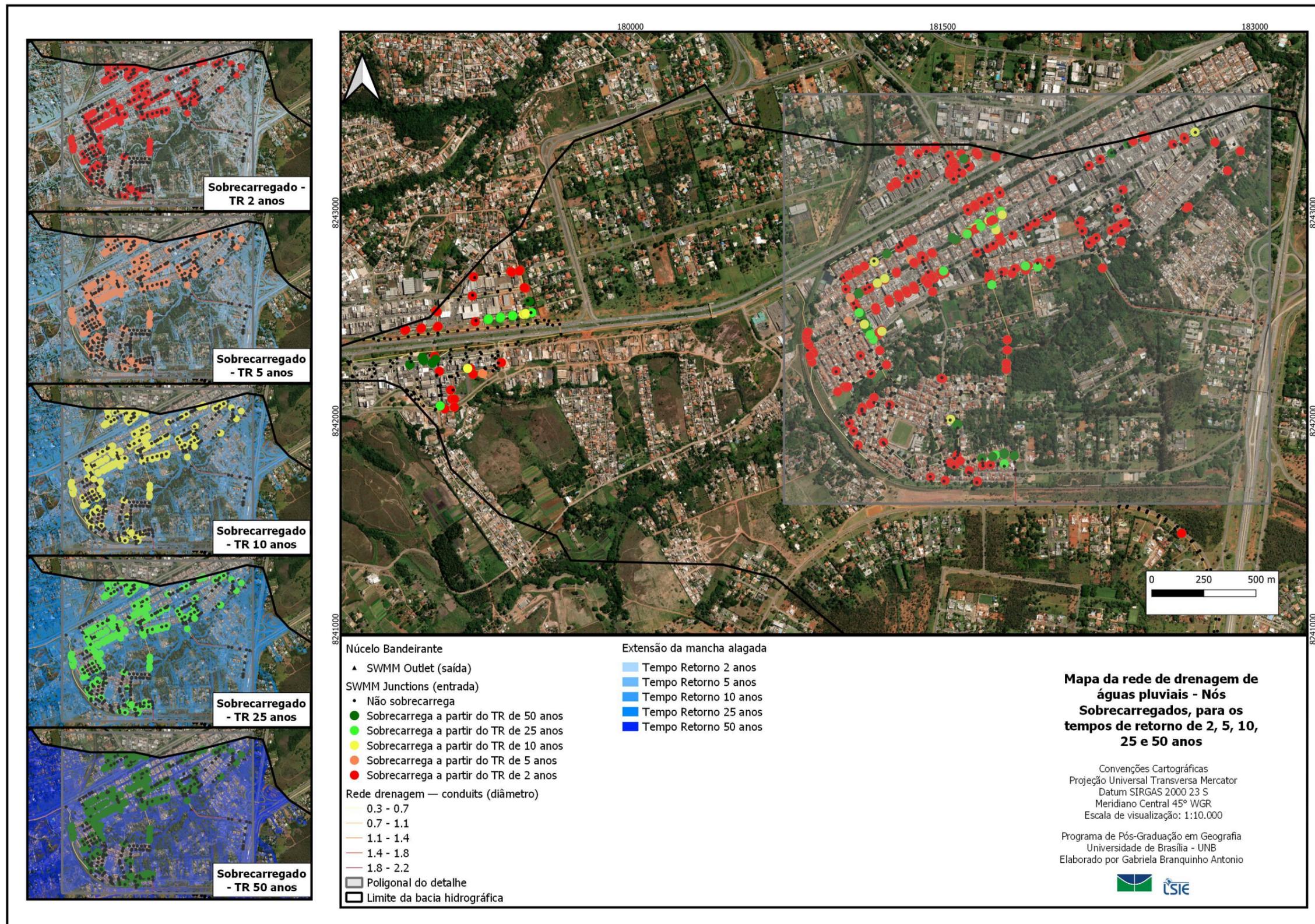


Figura 174 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Núcleo Bandeirantes, Distrito Federal.

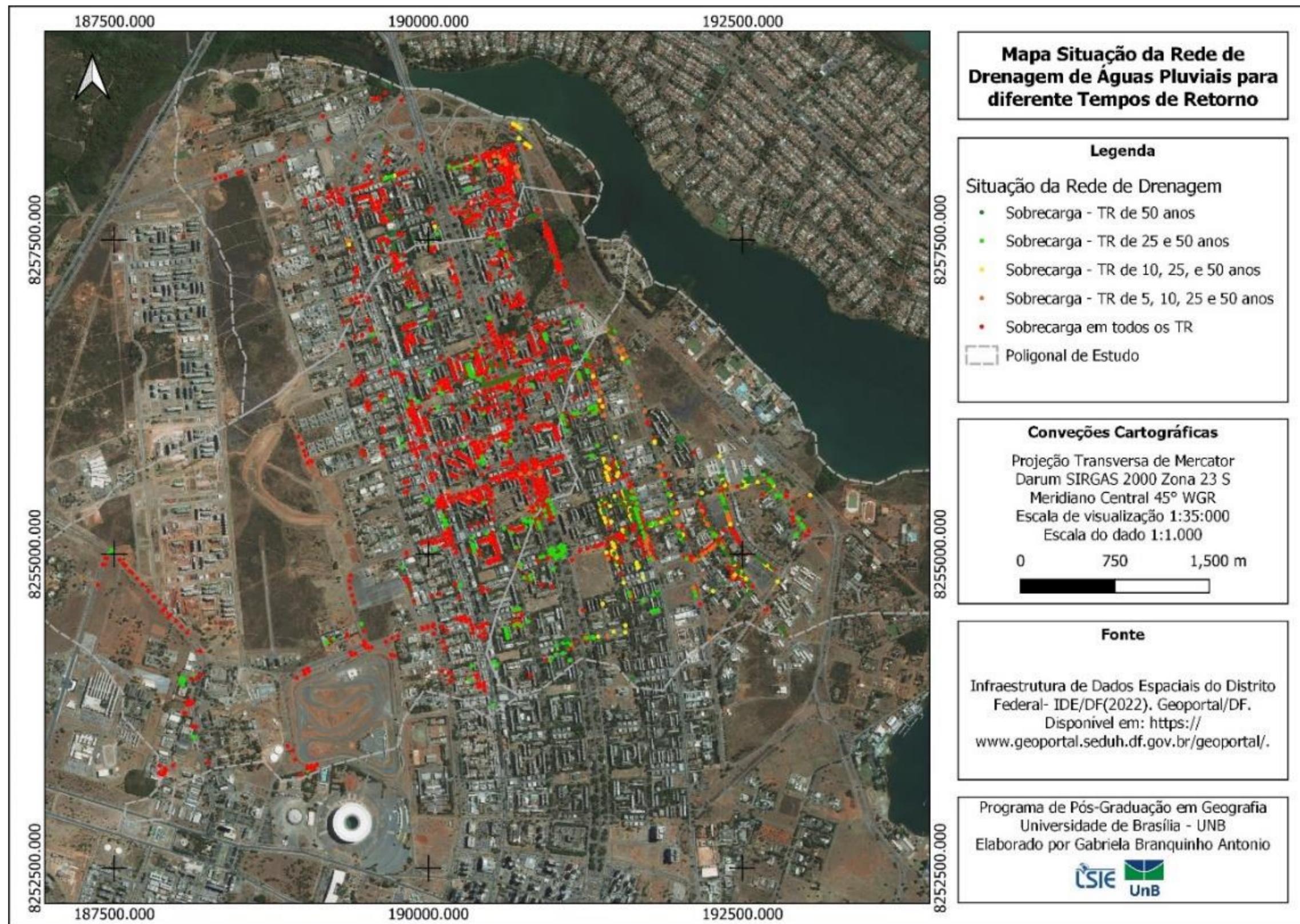


Figura 175 - Status dos nós sobrecarregados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica da Asa Norte – Plano Piloto, Distrito Federal.

APÊNDICE P: REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS, NÓS INUNDADOS

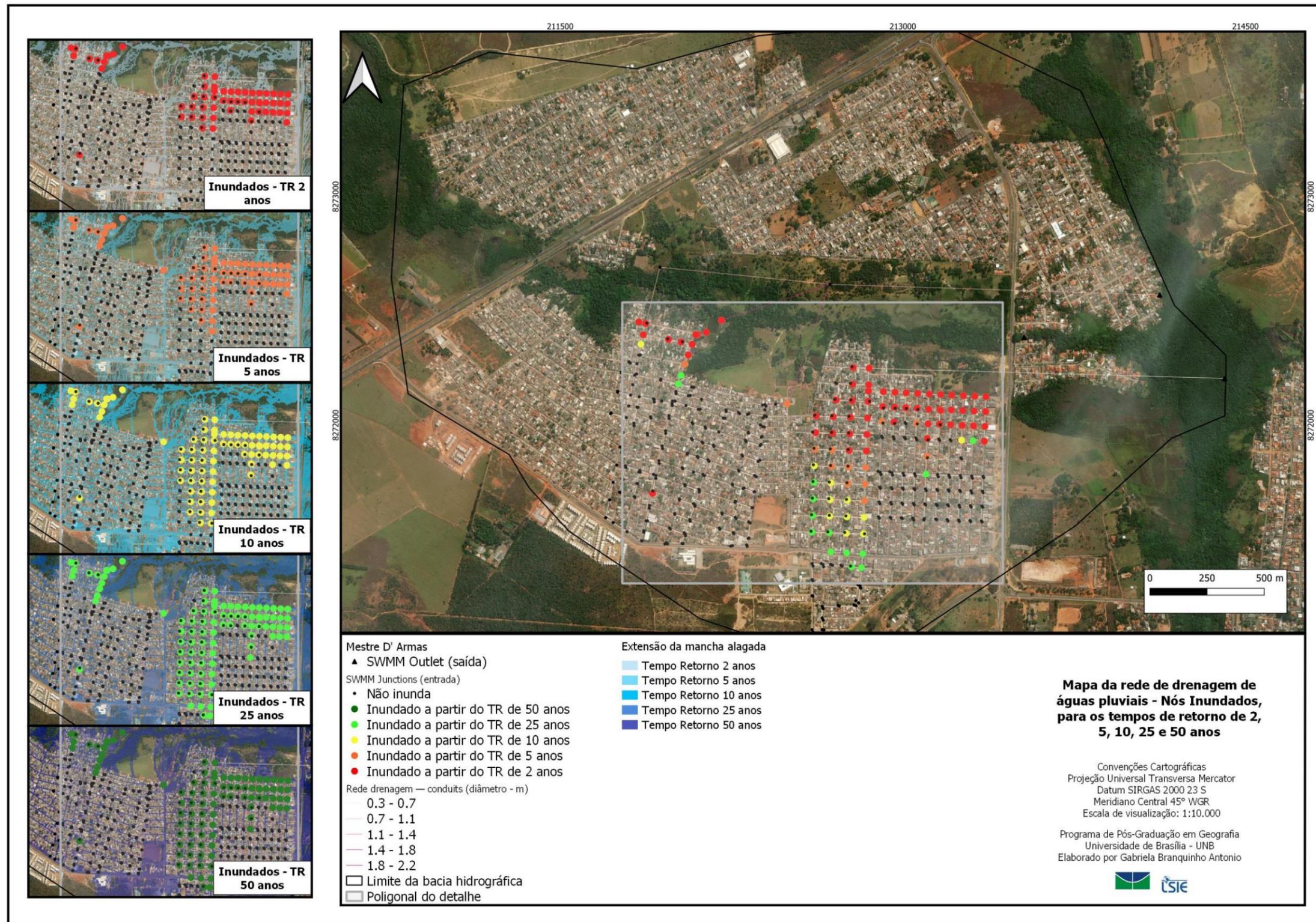


Figura 176 – Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Mestre D' Armas, Planaltina, Distrito Federal.

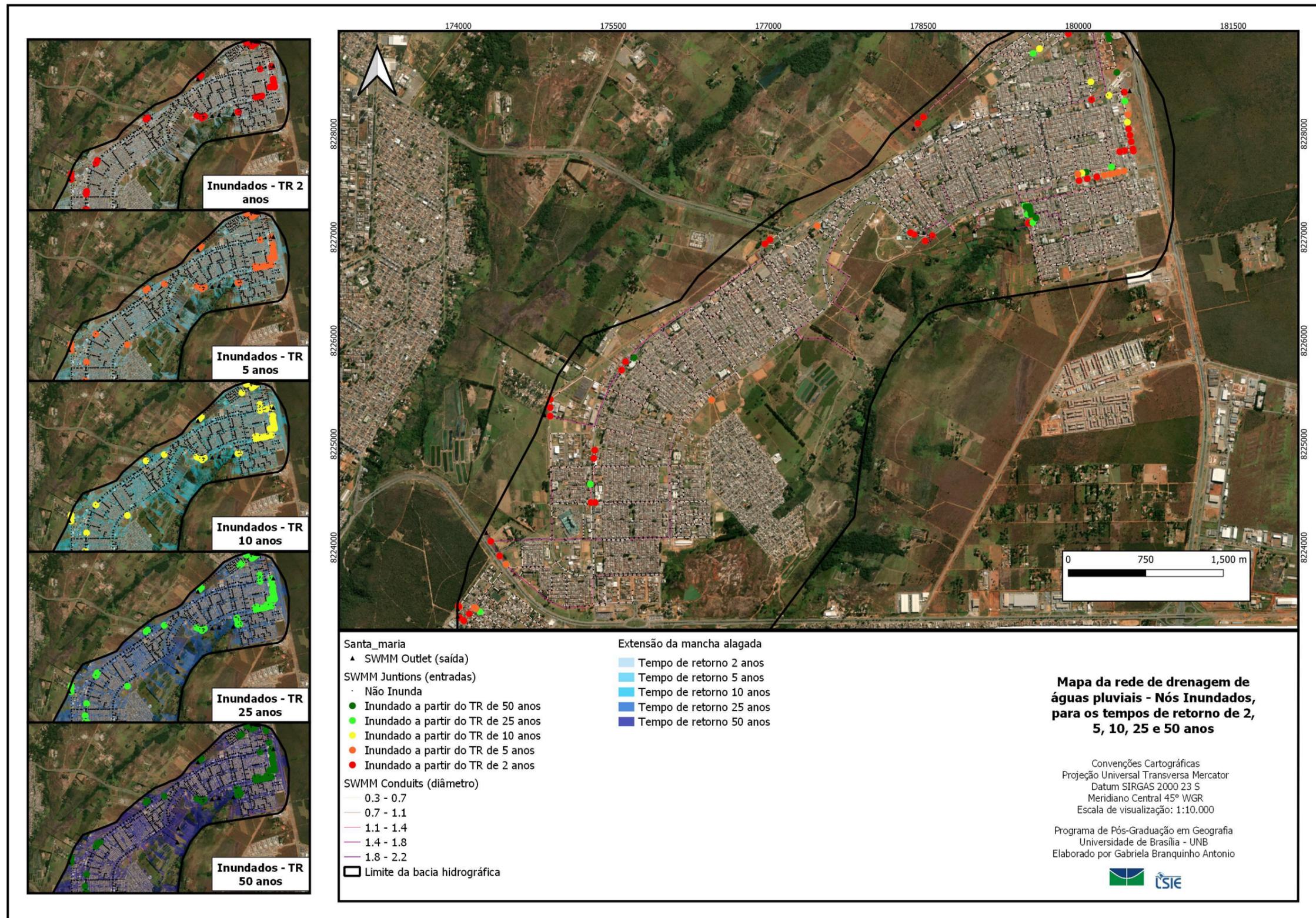


Figura 177 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Santa Maria, Distrito Federal.

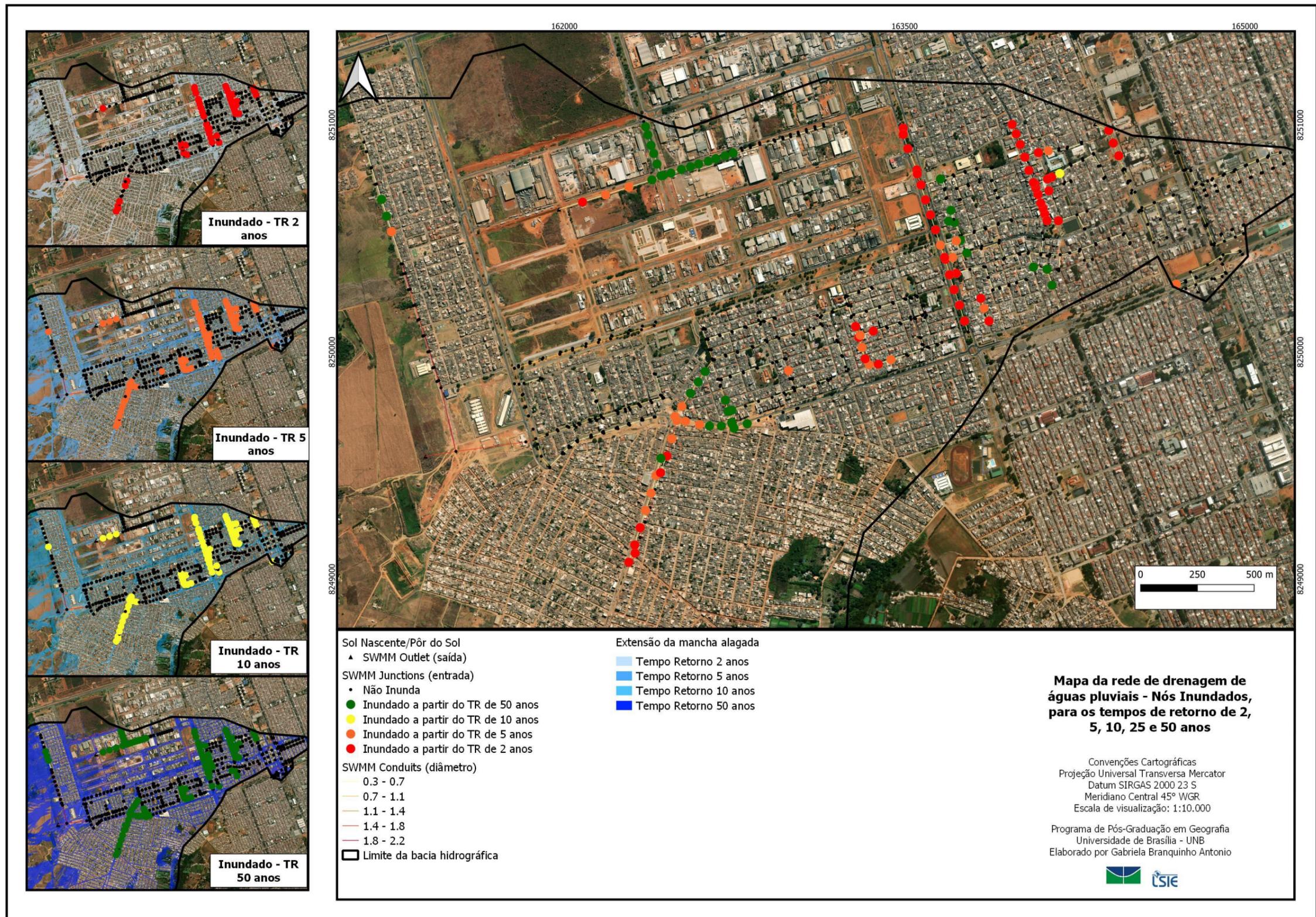


Figura 178 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Sol Nascente/Pôr do Sol, Distrito Federal.

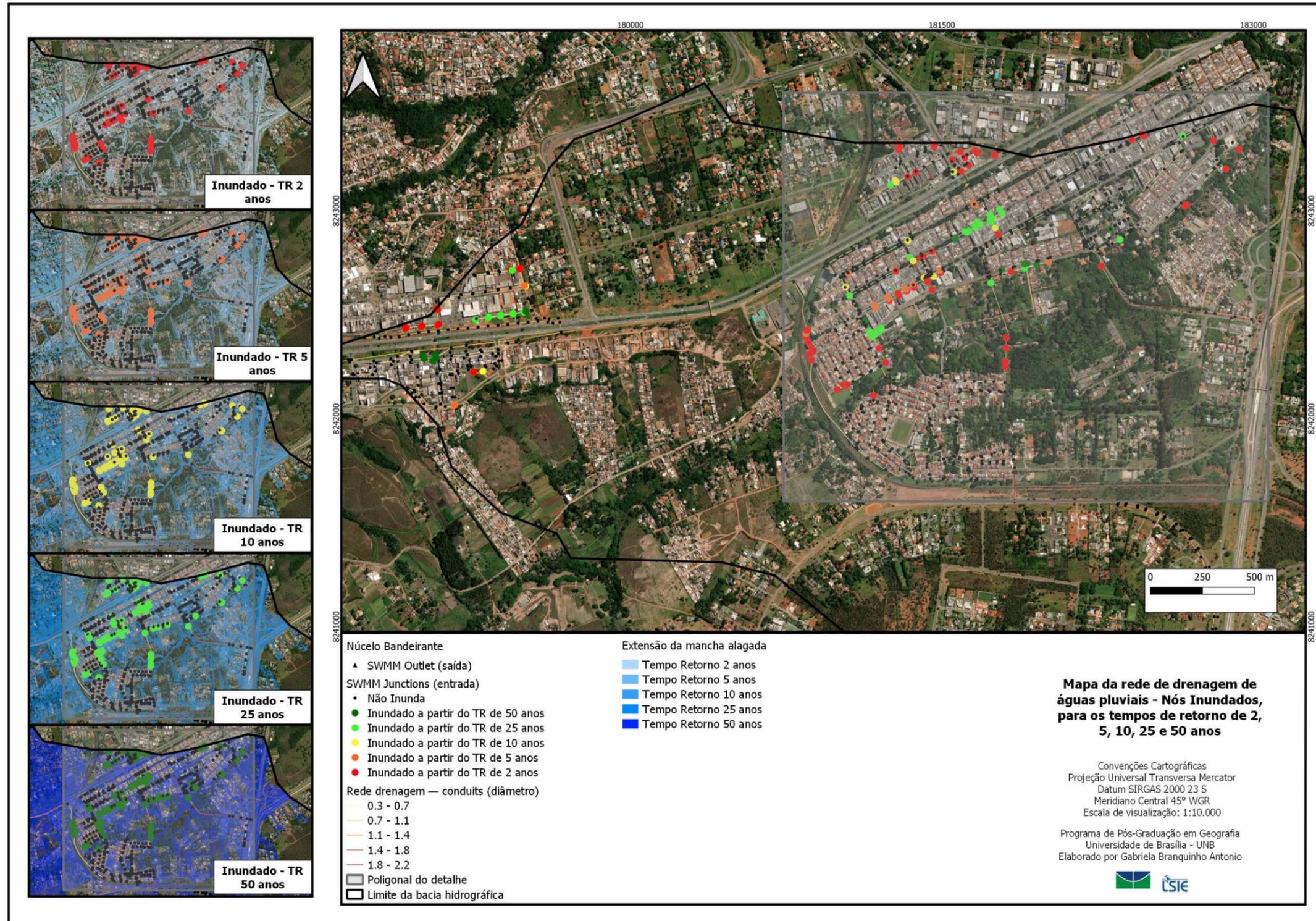


Figura 179 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica de Núcleo Bandeirantes, Distrito Federal.

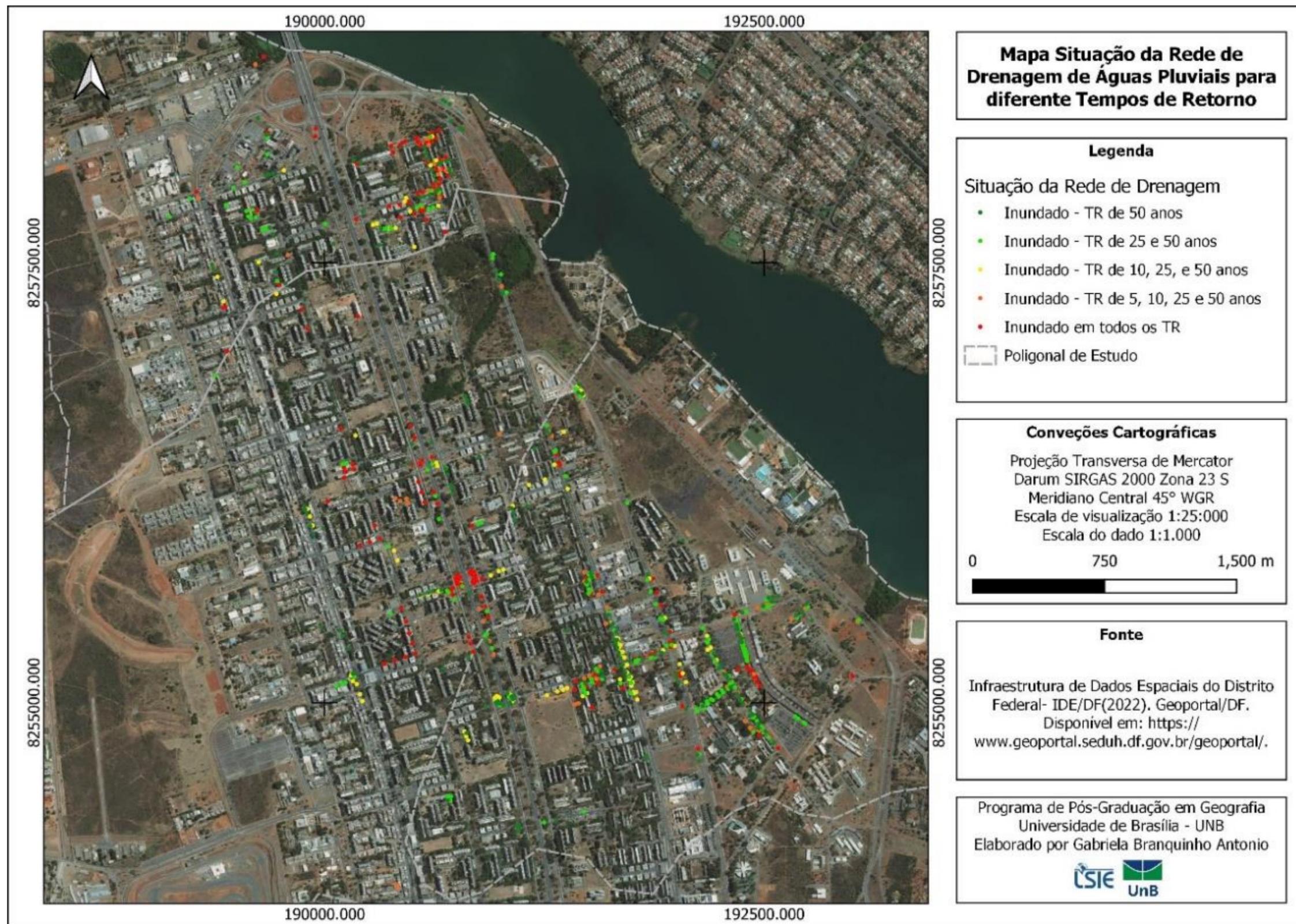


Figura 180 - Status dos nós inundados da rede de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica da Asa Norte – Plano Piloto, Distrito Federal.

